

IGOR OLIVEIRA FELICE

**UM ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DE PINOS EM
UNIÃO HÍBRIDA METAL-COMPÓSITO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA
2017**

IGOR OLIVEIRA FELICE

UM ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DE PINOS EM UNIÃO HÍBRIDA METAL-COMPÓSITO

Projeto de Conclusão de Curso
apresentado ao Colegiado do Curso de
Graduação em Engenharia Aeronáutica da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte
dos requisitos para obtenção do título de
**BACHAREL EM ENGENHARIA
AERONÁUTICA.**

Orientador: Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

UBERLÂNDIA – MG

2017

IGOR OLIVEIRA FELICE

UM ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DE PINOS EM UNIÃO HÍBRIDA METAL-COMPÓSITO

Projeto de Conclusão de Curso **APROVADO**
pelo corpo docente do Curso de Graduação em
Engenharia Aeronáutica da Universidade
Federal de Uberlândia.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ruham Pablo Reis – Orientador
Universidade Federal de Uberlândia

Profa. Dra. Núbia dos Santos Saad
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov
Universidade Federal de Uberlândia

Uberlândia, Agosto de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por cada realização pessoal e profissional. Sou grato também às pessoas que participaram direta ou indiretamente no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Ruham Pablo Reis, meus sinceros agradecimentos por toda a disposição, apoio e ensinamentos transferidos não só durante a orientação deste trabalho, mas também ao longo dos seis anos de graduação. Ao aluno de doutorado Iaroslav Skhabovskyi, pela atenção e entusiasmo durante as fases de fabricação dos corpos de prova, especificamente nas etapas de tratamento superficial e soldagem dos pinos. À Prof. Núbia dos Santos Saad, pelo ânimo, entusiasmo e prontidão em realizar todos os ensaios de tração mesmo frente às limitações de tempo e de materiais do laboratório. Aos técnicos administrativos Lázaro Enrique e Diego Augusto Costa Alves pelo auxílio também nas etapas de fabricação dos corpos de prova. Aos colegas de turma pela companhia e alegrias dos últimos anos, em especial ao Pedro e Lucas que, além de amigos, foram grandes parceiros durante este projeto. À técnica Leandra Paulista de Carvalho, que muito além de ser a secretária do curso, tornou-se também uma grande amiga por quem tenho um carinho especial.

À minha família, minha eterna gratidão pelo suporte e apoio ao longo de toda minha vida. Aos meus amigos e primos, agradeço pela força, empenho, amizade e sabedoria transferida ao longo deste trabalho, da graduação e da vida. À Caroline, Isabela, Fernando, Rafaela, Silvio e Roberto por serem eternos amigos/irmãos. Por fim, um reconhecimento em especial ao Luiz Fernando por todo o incentivo, compreensão, companheirismo e paciência transbordados na nossa vida.

FELICE, I. O. **Um estudo da influência da inclinação de pinos em uma união híbrida metal-compósito**. 2017. 62 f. Projeto de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Aeronáutica, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

RESUMO

Um dos maiores desafios da indústria aeroespacial é otimizar a relação entre peso e resistência mecânica dos componentes estruturais. Nesse sentido, há uma grande tendência em substituir elementos metálicos por elementos fabricados em materiais compósitos, tendo em vista que apresentam menor densidade e demonstram resistência mecânica adequada para certas aplicações. Em contrapartida, em algumas seções aeronáuticas, o uso de metais é imprescindível. Com isso, é necessário o desenvolvimento de estudos que busquem caracterizar e identificar avanços na junção entre os compósitos e metais. Este estudo utilizou do conceito de juntas híbridas (combinação de travamento mecânico e adesivo) para unir chapas de aço superficialmente tratadas com chapas de material compósito fabricadas com fibras de vidro, e possibilitou a avaliação do efeito mecânico da inclinação dos pinos de travamento. Através do método de soldagem CMT-PIN, os pinos com cabeça abaulada foram produzidos sobre a estrutura metálica em três inclinações distintas e, posteriormente, as fibras de vidro foram depositadas e laminadas com a própria resina, servindo como colagem adesiva, formando juntas híbridas entre metal-compósito após a cura. Quatro corpos de prova de cada inclinação foram produzidos (somando doze unidades), dos quais dez foram testados e analisados com relação a: processo de soldagem, massa adicionada, rigidez e resistência. Foi efetuada comparação dos resultados com valores apresentados pela literatura para pinos sem inclinação. Constatou-se que não houve alteração significativa de massa e rigidez com a deposição de pinos inclinados nas placas ensaiadas. Observou-se que o benefício da inclinação dos pinos em juntas híbridas é pequeno, porém presente. Percebeu-se que pinos inclinados a 15° apresentam comportamento mecânico superior aos inclinados a 25° e 35°. Possíveis razões para a não contribuição para melhorar o desempenho mecânico da junta híbrida com maiores inclinações dos pinos são apresentadas.

PALAVRAS CHAVE: *junta híbrida avançada, união metal-compósito, CMT PIN, inclinação dos pinos, resistência mecânica.*

FELICE, I. O. **A study on the influence of inclination of pins in composite-metal hybrid joining**. 2017. 62 p. Undergraduate Thesis, Graduate Course in Aeronautical Engineering, Federal University of Uberlândia, Brazil.

ABSTRACT

One of the major challenges of aeronautics and aerospace industries is to optimize the relationship between weight and mechanical strength of structural components. In this sense, there is a great tendency to replace metallic elements by elements made of composite materials, considering that they have a lower density and demonstrate satisfactory mechanical resistance for specific applications. On the other hand, in some aeronautical sections, the use of metals is mandatory. With this, it is necessary the development of studies that seek to characterize and identify advances at the junctions between composites and metals. This study applied the concept of hybrid joints (mechanical and adhesive locking combination) to join surface treated steel sheets with fiberglass composite sheets, and allowed na evaluation the effect of locking pins inclination on mechanical behaviour. Through the CMT-PIN welding method, the pins were produced on the metal surface at three different inclinations and, subsequently, the glass fibers were deposited and laminated with the resin itself, serving as adhesive bonding and forming hybrid metal-composite joints after curing. Four test specimens from each inclination group were produced (in a total of twelve units) of which ten were tested and analyzed for: welding process, added mass, stiffness and strength. The results were compared with values presented in the literature for pins with no inclination. It was verified that there was no significant change of mass and and stiffness with the deposition of inclined pins on the samples. It has been observed that the benefit of pin inclination in hybrid joints is minor but it exists. It was noticed that pins inclined to 15° presented mechanical behavior superior to those inclined to 25° and 35°. Possible reasons for not contributing to improve the mechanical performance of the hybrid joint with higher pin inclinations are presented.

KEYWORDS: *Advanced hybrid joint, metal-composite joint, CMT PIN, inclination of pins, mechanical strenght.*

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DE FIXAÇÃO POR MÉTODO DE UNIÃO: A) MECÂNICA (PINOS); B) ADESIVA; C) HÍBRIDA.....	2
FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO DE PINOS INCLINADOS SOLDADOS NA CHAPA METÁLICA.....	3
FIGURA 3 – SEQUÊNCIA DE EXECUÇÃO DO TRABALHO.....	4
FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DOS MATERIAIS NA SUPERFÍCIE DO EUROFIGHTER TYPHOON. FONTE: EUROFIGHTER TYPHOON - THE AIRCRAFT.	6
FIGURA 5 - MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE UM BOEING 787 DREAMLINER. FONTE: BOEING 787 DREAMLINER SPECS.	6
FIGURA 6 – JUNÇÃO METAL-COMPÓSITO REALIZADA APENAS POR COLAGEM ADESIVA. FONTE: SMITH, 2004... 8	8
FIGURA 7 – RESINA APLICADA, COMPACTADA E CURADA SOBRE SUPERFÍCIE METÁLICA. FONTE: GRADINGER, UCSNIK, & SCHEERER, 2011	8
FIGURA 8 – TIPOS DE JUNTAS ADESIVAS. FONTE: ADAMS, COMYN, & WAKE, 1997.	9
FIGURA 9 – CHAPA DE METAL UNIDA A PAINEL DE COMPÓSITO REFORÇADO COM FIBRA POR ADESIVAGEM E FIXAÇÃO MECÂNICA (USO DE PARAFUSO E PORCAS). FONTE: MATSUZAKI ET AL., 2007.	10
FIGURA 10 – VISTA EM CORTE DO MODELO DE UNIÃO HÍBRIDA, COMBINANDO UNIÃO ADESIVA (ADHESIVE) SOBRE O METAL (METAL ADHEREND) E TRAVAMENDO MECÂNICO (PINS) DENTRO DO PRF (FRP). FONTE: GRAHAM, REZAI, BAKER, SMITH, & WATTS, 2014.	11
FIGURA 11 – ALGUMAS FOMAS DE PINOS PARA UNIÃO HÍBRIDA. EM SEQUÊNCIA: CILÍNDRICO (ESQUERDA), CABEÇA PIRAMIDAL (MEIO) E CABEÇA REDONDA (DIREITA).....	11
FIGURA 12 – SEQUÊNCIA DE PINOS DEPOSITADOS PELA TÉCNICA DE REESTRUTURAÇÃO DE SUPERFÍCIE. FONTE: SMITH, 2004.....	12
FIGURA 13 – CURVA DE CARGA VERSUS DESLOCAMENTO PARA AMOSTRAS COM PINOS FABRICADOS POR REESTRUTURAÇÃO DE SUPERFÍCIE (COMELD TM) E PARA AMOSTRAS APENAS COM COLAGEM ADESIVA (CONTROL). FONTE: SMITH, 2004.....	12
FIGURA 14 – EM DETALHE A GEOMETRIA DOS PINOS FABRICADOS POR REESTRUTURAÇÃO DE SUPERFÍCIE (IMAGEM DE RADIOGRAFIA). FONTE: SMITH, 2004.	13
FIGURA 15 – CURVA TENSÃO VERSUS DESLOCAMENTO PARA AMOSTRAS DE JUNTAS METAL-COMPÓSITO ADESIVAS (CONTROL) E COM PINOS (HYBRID) APLICADAS EM CHAPAS DE ALUMÍNIO (A1) E TITÂNIO (T1). FONTE: GRAHAM, REZAI, BAKER, SMITH, & WATTS, 2014	14
FIGURA 16 – DIREÇÃO DA PROPAGAÇÃO DA FALHA EM TESTE MECÂNICO. (A) UNIÃO APENAS ADESIVA; (B) UNIÃO HÍBRIDA. FONTE: MATSUZAKI, SHIBATA, & TODOROKI, 2008	15
FIGURA 17 – CURVA TENSÃO VERSUS DESLOCAMENTO PARA OS TRÊS TIPOS DE UNIÕES. FONTE: MATSUZAKI ET AL. 2008.	16
FIGURA 18 – CURVA S-N DO ENSAIO DE FADIGA PARA DOIS TIPOS DE UNIÕES.FONTE: MATSUZAKI ET AL. 2008.	16
FIGURA 19 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MECANISMO DE FALHA PARA: (A) UNIÃO POR FIXADORES MECÂNICOS E (B) UNIÃO HÍBRIDA. FONTE: MATSUZAKI ET AL, 2008.	17
FIGURA 20 - TOCHA DIFERENCIADA DO PROCESSO CMT. FONTE: CMT: COLD METAL TRANSFER, 2016.	19
FIGURA 21 - ILUSTRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG CMT. FONTE: FRONIUS INTERNATIONAL, 2016.	19
FIGURA 22 – PINOS SOLDADOS POR MIG/MAG CMT PIN. (A) PINOS CILÍNDRICOS; (B) PINOS DE CABEÇA ABAULADA. FONTE: UCSNIK, SCHEERER, ZAREMBA, & PAHR, 2009.....	20
FIGURA 23 – REPRESENTAÇÃO EM COTAS DA CHAPA DE AÇO UTILIZADA NA FABRICAÇÃO DOS CP'S.	21
FIGURA 24 – CHAPA DE AÇO DEVIDAMENTE IDENTIFICADA.....	21
FIGURA 25 – ARAME DE SOLDA MIG/MAG ER70S-6. FONTE: (FERRAMENTAS GERAIS).	22

FIGURA 26 – MODELO DE TECIDO DO TIPO PLAIN WEAVE DE FIBRA DE VIDRO. FONTE: SERCEL	22
FIGURA 27 – ADESIVO (RESINA) PARA LAMINAÇÃO UTILIZADO.	23
FIGURA 28 – PINOS COM SOLDA ENFRAQUECIDA SE SOLTARAM DA SUPERFÍCIE. DESTAQUE PARA A PRESENÇA DE ÓXIDOS NA CHAPA.	24
FIGURA 29 – CHAPA DE AÇO CORTADA PELA METADE E PRONTA PARA O INÍCIO DO PROCESSO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL.	24
FIGURA 30 – DISCO DE DESBASTE ABRASIVO UTILIZADO.	25
FIGURA 31 – CHAPA DE AÇO APÓS TRATAMENTO. DETALHE PARA A REGIÃO TRATADA À DIREITA (ONDE HOUVE DEPOSIÇÃO DE PINOS) E A NÃO TRATADA À ESQUERDA.	25
FIGURA 32 – À ESQUERDA A FONTE FRONIUS TPS5000CMT (1) E O ROBÔ MOTOMAN HP20 (2). À DIREITA O PAINEL DE CONTROLE (RCU5000I) E MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM DA FONTE. (MOREIRA, 2016)	26
FIGURA 33 – FIXAÇÃO DE CHAPA DE AÇO (1) NO SUPORTE DE AÇO (3) COM USO DE CHAPAS AUXILIARES (2) E CONJUNTOS DE PORCA, PARAFUSOS E ARRUELAS (4).	26
FIGURA 34 – ILUSTRAÇÃO DO PADRÃO GEOMÉTRICO DE PINO OBTIDO.	27
FIGURA 35 – REPRESENTAÇÃO DO PINO SOLDADO COM ÂNGULO DE INCLINAÇÃO.	28
FIGURA 36 – TRANSFERIDOR SENDO UTILIZADO PARA MEDIÇÃO DA INCLINAÇÃO DA MESA DE SUPORTE.	28
FIGURA 37 – REPRESENTAÇÃO DA INCLINAÇÃO DA MESA DE SUPORTE PARA DEPOSIÇÃO DOS PINOS. (1) TOCHA DE SOLDAGEM NA POSIÇÃO VERTICAL (2) PARAFUSOS E ROSCAS FIXANDO A MESA (3) CHAPAS AUXILIARES FIXANDO A MESA (4) MESA DE SUPORTE EM AÇO (5) ÂNGULO DE INCLINAÇÃO (15°, 25° OU 35°)	29
FIGURA 38 – REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DAS POSIÇÕES DE SOLDAGEM DOS PINOS.	29
FIGURA 39 – DISPOSIÇÃO DAS 12 CHAPAS DE AÇO COM PINOS SOLDADOS (1). NOTA-SE O USO DE 8 CHAPAS AUXILIARES (2) E DO PORCELANATO (3), AMBOS DEVIDAMENTE ENCRERADOS COM DESMOLDANTE.	30
FIGURA 40 – APLICAÇÃO DE RESINA E MANTA DE FIBRA DE VIDRO. À ESQUERDA, PRIMEIRA CAMADA DE FIBRA DE VIDRO E RESINA SENDO PRESSIONADA PELO ROLO DE PINTURA (FRANZONI, 2017). À DIREITA, VÁRIAS CAMADAS DE FIBRA DE VIDRO LAMINADAS.	31
FIGURA 41 – DISPOSIÇÃO FINAL DAS DOZE ESTRUTURAS EM DOIS BLOCOS DE CHAPAS DE AÇO MAIS PINOS MAIS COMPÓSITO.	32
FIGURA 42 – CORPOS DE PROVA MARCADOS E DELIMITADOS APÓS A CURA.	32
FIGURA 43 – CORTE DO MATERIAL COMPÓSITO, SEPARANDO OS CPS.	33
FIGURA 44 – EXEMPLO DE CORPO DE PROVA APÓS ACABAMENTO NO MATERIAL COMPÓSITO AS DIMENSÕES MÉDIAS OBTIDAS PARA CADA SEGMENTO.	34
FIGURA 45 - VISÃO LATERAL CORPO DE PROVA APÓS ACABAMENTO EVIDENCIANDO A INTERFACE METAL-COMPÓSITO E SINAL DOS PINOS SOLDADOS.	34
FIGURA 46 – REPRESENTAÇÃO DA CORRENTE (ESQUERDA) E TENSÃO (DIREITA) VERSUS O TEMPO DURANTE O PROCESSO DE SOLDAGEM CMT PIN PARA CP'S COM PINOS COM 15° DE INCLINAÇÃO.	35
FIGURA 47 – REPRESENTAÇÃO DA CORRENTE (ESQUERDA) E TENSÃO (DIREITA) VERSUS O TEMPO DURANTE O PROCESSO DE SOLDAGEM CMT PIN PARA CP'S COM PINOS COM 25° DE INCLINAÇÃO.	36
FIGURA 48 – REPRESENTAÇÃO DA CORRENTE (ESQUERDA) E TENSÃO (DIREITA) VERSUS O DURANTE O PROCESSO DE SOLDAGEM CMT PIN PARA CP'S COM PINOS COM 35° DE INCLINAÇÃO.	36
FIGURA 49 – DETALHE DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO DE UM DOS SEIS PINOS SOLDADOS POR CMT PIN À ESQUERDA E APRESENTAÇÃO À DIREITA DO TEMPO TOTAL (CICLO) DE DEPOSIÇÃO (T).	37
FIGURA 50 – ESQUEMA DE FIXAÇÃO DA CÂMERA DE ALTA RESOLUÇÃO NA TOCHA DE SOLDAGEM.	38
FIGURA 51 - SEQUÊNCIA DE DEPOSIÇÃO DO PINO DE AÇO INOX NA SUPERFÍCIE METÁLICA APÓS O FECHAMENTO DO ARCO ELÉTRICO E DA SOLDAGEM DO ARAME.	38
FIGURA 52 – ETAPA DE MEDIÇÃO DA ALTURA DOS PINOS.	39

FIGURA 53 – GRÁFICO COM VALORES DE MÉDIA E DESVIO PADRÃO PARA ALTURA DOS PINOS.	40
FIGURA 54 – GRÁFICO COM VALORES DE MÉDIA E DESVIO PADRÃO PARA DIÂMETRO DA CABEÇA DOS PINOS.	41
FIGURA 55 – GRÁFICO COM VALORES DE MÉDIA E DESVIO PADRÃO PARA COMPRIMENTO DOS PINOS.	41
FIGURA 56 – INÍCIO DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO DOS PINOS INCLINADOS. DETALHE PARA O CONTATO ENTRE CHAPA, ARAME DE SOLDAGEM (PINO) E TOCHA DE SOLDAGEM.	42
FIGURA 57 – DEPOSIÇÃO DA SEGUNDA FILEIRA DE PINOS INCLINADOS.	42
FIGURA 58 – MOMENTO DE SOLDAGEM DO PINO NA CHAPA METÁLICA.	43
FIGURA 59 – SEIS PINOS INCLINADOS (25 GRAUS) SOLDADOS NA SUPERFÍCIE DA CHAPA METÁLICA.	43
FIGURA 60 – EXEMPLO DE BALANÇA SIMILAR À UTILIZADA NO PROCESSO DE AFERIÇÃO DE MASSA. FONTE: (SHIMADZU - EXCELLENCE IN SCIENCE, 2017)	44
FIGURA 61 – (A) MÁQUINA DE TRAÇÃO COM O CORPO DE PROVA JÁ POSICIONADO; (B) DETALHE DA GARRA FIXANDO A CHAPA DE AÇO E O COMPÓSITO; (C) DETALHE DO USO DA LIXA ENTRE COMPÓSITO E GARRA.	45
FIGURA 62 – SEQUÊNCIA DE FALHA ADESIVA DURANTE O TESTE DE TRAÇÃO.	46
FIGURA 63 – CURVA FORÇA X DESLOCAMENTO PARA CP'S COM PINOS INCLINADOS A 15°.	47
FIGURA 64 – CURVA FORÇA X DESLOCAMENTO PARA CP'S COM PINOS INCLINADOS A 25°.	47
FIGURA 65 – CURVA FORÇA X DESLOCAMENTO PARA CP'S COM PINOS INCLINADOS A 35°.	48
FIGURA 66 – CURVA FORÇA X DESLOCAMENTO PARA CP'S COM PINOS SEM INCLINAÇÃO. FONTE: CARNIO, L. P., 2017.	49
FIGURA 67 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO PARA CARGA SUPORTADA PELOS CP'S NO DESLOCAMENTO DE 0,1 MM.	51
FIGURA 68 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO PARA CARGA SUPORTADA PELOS CP'S NO DESLOCAMENTO DE 0,2 MM.	51
FIGURA 69 – ESQUEMA REPRESENTANDO A MENOR ALTURA PROJETADA DOS PINOS INCLINADOS.	53
FIGURA 70 – ESQUEMA REPRESENTANDO O ACÚMULO DE TENSÃO OCASIONADO PELA ROTAÇÃO DO PINO EM TORNO DO PONTO DE SOLDA E REPRESENTANDO O POSICIONAMENTO DAS FORÇAS DECOMPOSTAS NO PINO NA SITUAÇÃO DE PINO INCLINADO CONTRA A TRAÇÃO.	54
FIGURA 71 – ESQUEMA REPRESENTANDO O POSICIONAMENTO DAS FORÇAS DECOMPOSTAS NO PINO NA SITUAÇÃO DE PINO INCLINADO EM FAVOR DA TRAÇÃO.	54
FIGURA 72 - VALORES MÉDIOS E DE DESVIO PADRÃO CALCULADOS PARA O PARÂMETRO DE RIGIDEZ.	56

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPARAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DOS MATERIAIS NO PESO FINAL DAS AERONAVES FABRICADAS EM PERÍODOS DISTINTOS.	5
TABELA 2 - CONTRIBUIÇÃO DE MATERIAIS NO PESO DE DUAS AERONAVES MODERNAS.....	6
TABELA 3 - PARÂMETROS DE SOLDAGEM UTILIZADOS NO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO DOS PINOS.	27
TABELA 4 - DIMENSÕES DE ALTURA E COMPRIMENTO DO PINO E DIÂMETRO DA CABEÇA DO PINO.....	39
TABELA 5 – MASSA ACRESCIDA POR PINO ADICIONADO, MASSA ACRESCIDA NA CHAPA E PERCENTUAL DE GANHO DE MASSA DA CHAPA, OCASIONADO PELA DEPOSIÇÃO DOS PINOS.	44
TABELA 6 – VALORES DAS CARGAS MÁXIMA E DE FALHA ADESIVA (TODAS EM KN) PARA CADA CORPO DE PROVA.	49
TABELA 7 – VALORES DE CARGA SUPORTADA PARA CADA CORPO DE PROVA E DADOS ESTATÍSTICOS (TODOS EM KN) PARA DESLOCAMENTOS DE 0,1MM E 0,2MM.	50
TABELA 8 – VALORES DO PARÂMETRO DE RIGIDEZ PARA CADA CORPO DE PROVA E DADOS ESTATÍSTICOS PARA CADA GRUPO DE INCLINAÇÃO.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
CMT-Pin	<i>Cold Metal Transfer - Pin</i>
CP	Corpo de Prova
DBCP	Distância Bico de Contato-Peça
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
LAPROSOLDA (UFU)	Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem da Universidade Federal de Uberlândia
LMD	<i>Laser Metal Deposition</i>
LMEst (UFU)	Laboratório de Mecânica de Estruturas "Prof. José Eduardo Tannus Reis" da Universidade Federal de Uberlândia
LPM (UFU)	Laboratório de Projetos Mecânicos da Universidade Federal de Uberlândia
LSM (UFU)	Laboratório de Sistemas Mecânicos da Universidade Federal de Uberlândia
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas/Metal Active Gas</i>
P _{RIG}	Parâmetro de Rigidez
PRF	Polímero Reforçado com Fibra
R	Parâmetro de Correlação
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1	COMPÓSITOS E METAIS EM AERONAVES.....	5
3.2	FIXADORES METAL-COMPÓSITO (PRF).....	7
3.3	O PROCESSO DE SOLDAGEM DOS PINOS POR MIG/MAG CMT PIN	18
4	FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	21
4.1	DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS	21
4.2	TRATAMENTO SUPERFICIAL DA CHAPA METÁLICA	23
4.3	SOLDAGEM DOS PINOS.....	26
4.4	LAMINAÇÃO DA FIBRA DE VIDRO	30
4.5	CORTE E ACABAMENTO FINAL DOS CP'S	32
5	AValiação DOS CORPOS DE PROVA - RESULTADOS	35
5.1	MONITORAMENTO DA SOLDAGEM DOS PINOS.....	35
5.2	ANÁLISE DE MASSA	43
5.3	TESTES DE TRAÇÃO.....	44
5.4	PARÂMETRO DE RIGIDEZ.....	54
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES	57
7	POTENCIALIDADES E TRABALHOS FUTUROS.....	58
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

O uso de materiais compósitos tem se tornado cada vez mais frequente no universo da engenharia moderna. Dentro da manufatura aeronáutica, a aplicação destes materiais é nítida e crescente devido ao destaque na redução de peso estrutural e à similar (ou até mesmo superior) eficiência mecânica que apresentam quando comparados com estruturas puramente metálicas. Apesar de possuírem algumas propriedades distintas, metais e compósitos constantemente interagem entre si. Sendo assim, uma análise da fixação entre estruturas metálicas e compósitos (ou material polimérico) precisa ser amplamente estudada, contribuindo para o aperfeiçoamento destas uniões.

Historicamente, a junção entre estruturas metálicas e não-metálicas em aeronaves vem sendo realizada por fixadores puramente mecânicos como rebites, porcas e parafusos. A razão para isto é que a união feita apenas por colagem adesiva apresenta limitações de carga suportada. Estima-se que cerca de 2,7 milhões de fixadores (mecânicos e não-mecânicos) estão presentes em um único avião modelo 777 da fabricante Boeing (Gradinger, Ucsnik, & Scheerer, 2011). Isso evidencia a importância desses fixadores na montagem de estruturas de aeronaves.

A utilização exclusiva de fixadores mecânicos na união entre chapas metálicas e compósitos apresenta uma série de problemas relacionados à distribuição de carga na junção (concentração de tensão em furos) e também à integridade das fibras. Sendo assim, uma solução alternativa mista (híbrida), tema de estudo deste trabalho, foi desenvolvida para aplicações em estruturas leves e aeronáuticas, combinando o método de colagem adesiva ao uso de fixadores mecânicos (Ucsnik, Scheerer, Zaremba, & Pahr, 2009). Estas três formas de fixação são ilustradas na Figura 1.

Neste trabalho foram fabricados doze corpos de prova, onde uma chapa de aço 1020 e uma estrutura de polímero reforçado com fibra de vidro (compósito) foram unidas pelo método híbrido. Foi realizado teste de tração e posteriormente analisados valores de carga máxima, curva carga aplicada versus deslocamento, parâmetro de rigidez e acréscimo de massa.

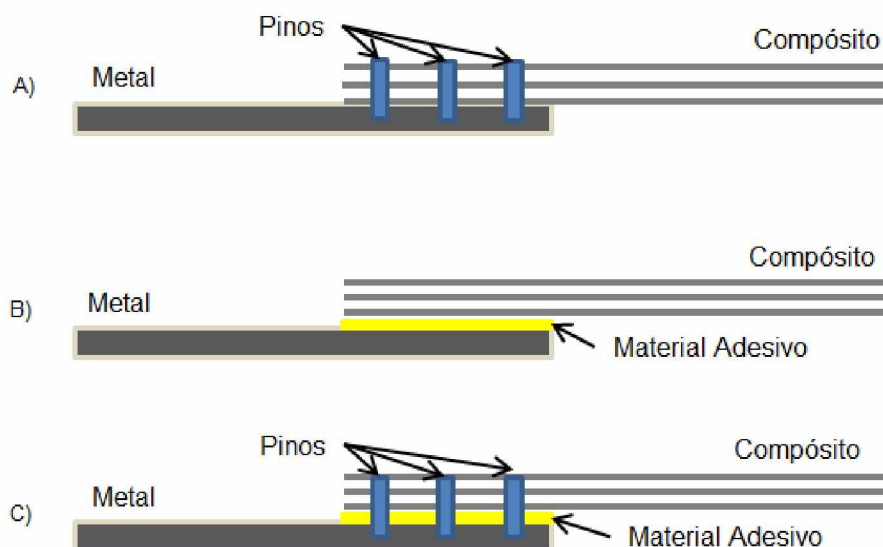


Figura 1 - Representação de fixação por método de união: A) mecânica (pinos); B) adesiva; C) híbrida

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência da inclinação de pinos soldados na parte metálica como ancoradores mecânicos em uma união híbrida entre metal e compósito (Figura 2). A ideia compreende a fabricação de corpos de prova compostos por uma chapa de aço e outra de compósito, sendo ambas unidas pelo método de fixação híbrido, que combina uma colagem adesiva provida de resina e a presença mecânica de pinos cilíndricos de cabeça abaulada soldados na chapa de aço. Para a fixação dos pinos, o processo de soldagem MIG/MAG CMT PIN foi adotado. A laminação do compósito foi feita manualmente. É esperado que a resina presente na face do compósito contribua positivamente com a adesão entre as superfícies do metal e do compósito. Enquanto isso, deseja-se que os pinos soldados na superfície metálica exerçam uma função de travamento para as fibras e resina após o processo de cura. O uso dos pinos inclinados visa amplificar a função mecânica descrita acima, intensificando ainda mais a trava exercida pelos mesmos sobre o compósito.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Compreender a técnica de deposição CMT PIN;
- Aplicar os conhecimentos adquiridos na fabricação dos corpos de prova;
- Analisar a variação de massa com a deposição dos pinos por CMT PIN;

- Observar a qualidade da junta híbrida presente na união entre as chapas de metal e compósito;
- Verificar a variação da resistência mecânica das juntas híbridas devido a inclinação dos pinos como ancoradores mecânicos;
- Analisar o estado final dos pinos e da junta híbrida após o final dos testes mecânicos.

Dessa forma, espera-se ampliar a utilização de métodos avançados de fixação entre metais e compósitos e, principalmente, desenvolver novas idéias e conceitos que aperfeiçoem a metodologia já existente, sempre visando aumentar a resistência mecânica das estruturas aeronáuticas e similares.

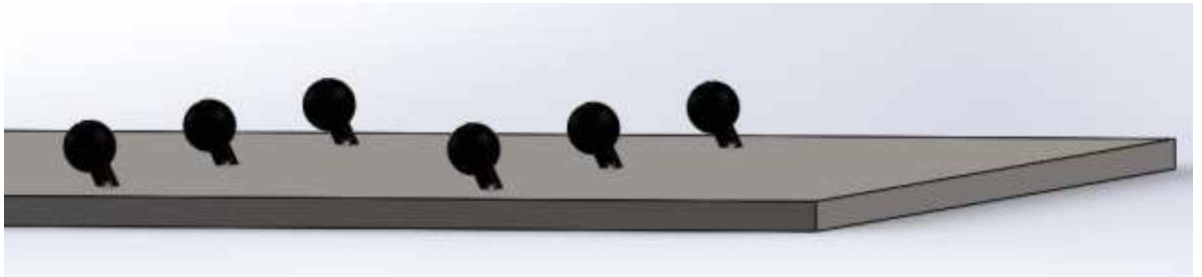


Figura 2 – Representação de pinos inclinados soldados na chapa metálica.

A sequência de execução do trabalho utilizada para alcançar estes objetivos é apresentada resumidamente na Figura 3.

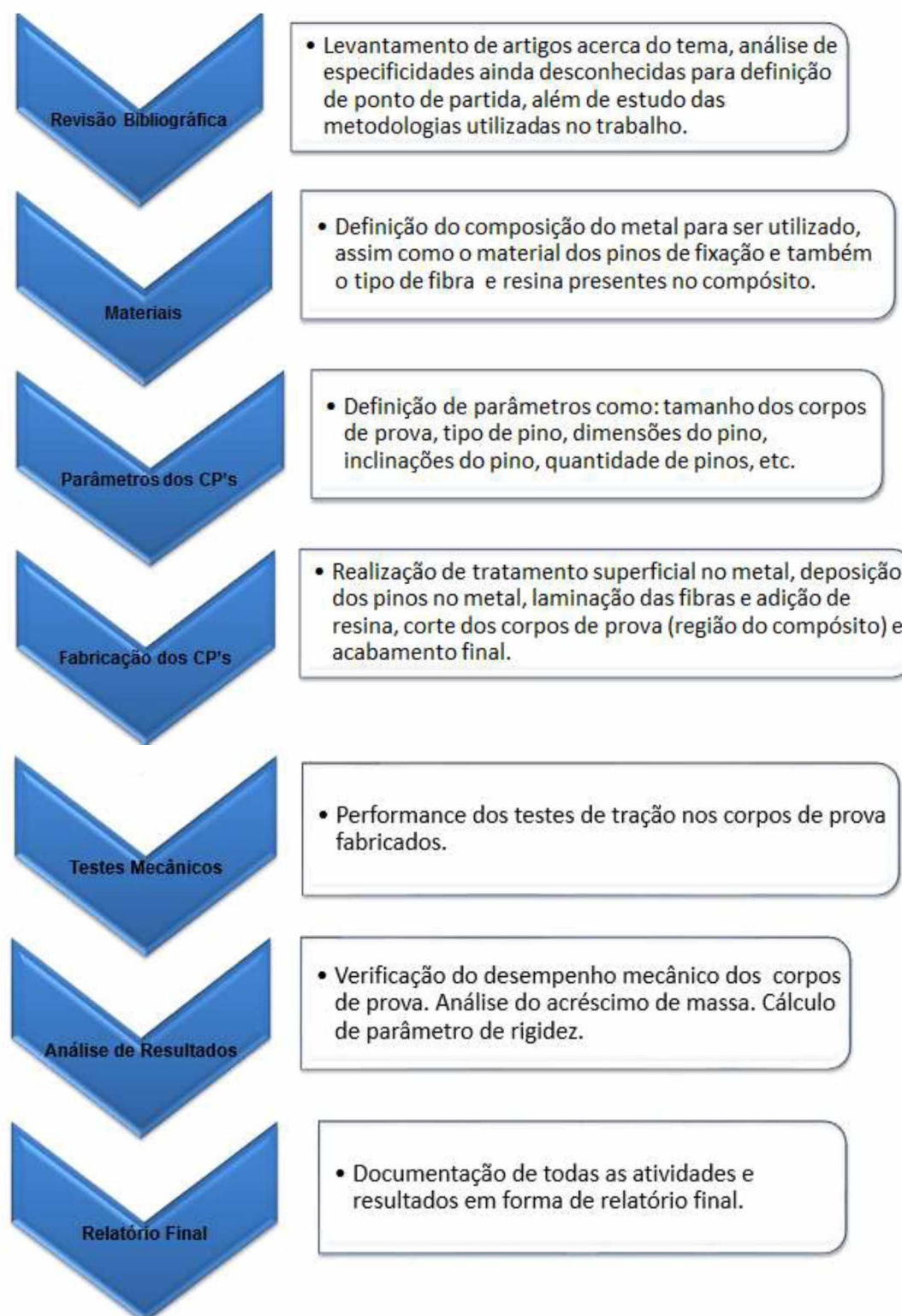


Figura 3 – Sequência de execução do trabalho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 COMPÓSITOS E METAIS EM AERONAVES

O uso de materiais compósitos tem se tornado cada dia mais recorrente no mundo moderno. Verifica-se sua aplicação em diversos segmentos da manufatura, como na produção de materiais esportivos de alta performance, em peças de aerogeradores, estruturas de submarinos e aeronaves, entre outras. Com a crescente demanda e complexidade das funcionalidades dos mais variados produtos, faz-se necessário o maior desenvolvimento destes materiais em termos de custos e processos de fabricação.

Na indústria da aviação observa-se uma tendência de substituição de materiais metálicos por compósitos poliméricos estruturais. Como visto na Tabela 1, o destaque está na redução do uso do alumínio e suas ligas, tendo em vista que, em aplicações específicas, os desempenhos em termos mecânicos dos dois materiais são similares e a reduzida densidade dos materiais compósitos os tornam vantajosos posto que os centros de fabricação aeronáutica buscam constantemente a redução de peso estrutural (Rezende, 2000).

Tabela 1 - Comparação da contribuição dos materiais no peso final das aeronaves fabricadas em períodos distintos.

Boeing 787 Dreamliner – produção em 2010	
Materiais Compósitos	50%
Alumínio e suas Ligas	20%
Outros Materiais	30%
Boeing 777 – produção em 1993	
Materiais Compósitos	12%
Alumínio e suas Ligas	50%
Outros Materiais	38%

Fonte: Boeing 787 Dreamliner Specs – adaptado.

Nos dois campos da aviação, civil e militar, os materiais compósitos têm sido protagonistas na composição estrutural. A aeronave de combate Eurofighter Typhoon apresenta 70% de aporte de compósitos na área superficial final do equipamento (Eurofighter Typhoon - The Aircraft), enquanto as aeronaves de transporte civil Airbus A350-XWB e Boeing 787 apontam uma contribuição no peso final de 53% e 50% respectivamente (Airbus A350 Specs). Tais informações são ilustradas nas Figuras 4 e 5 e na Tabela 2.

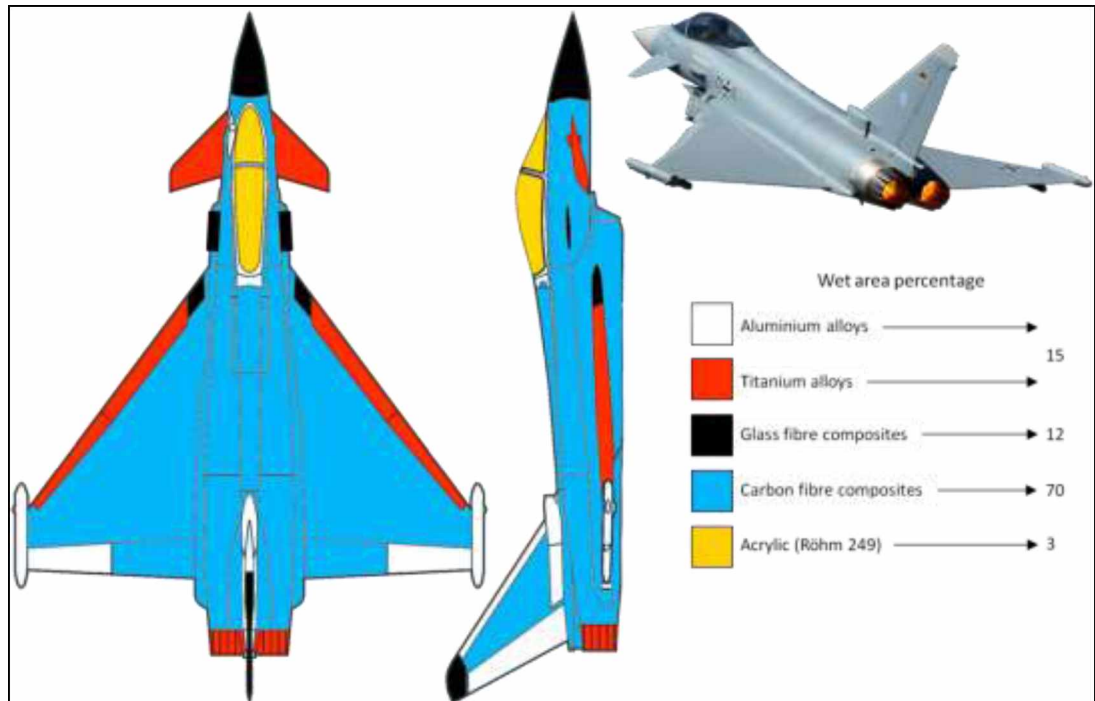


Figura 4 - Distribuição dos materiais na superfície do Eurofighter Typhoon. Fonte: Eurofighter Typhoon - The Aircraft.

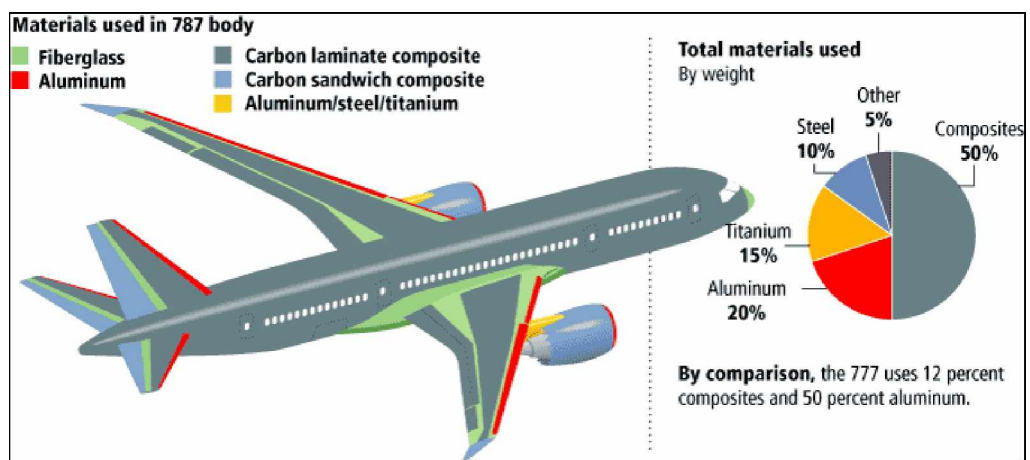


Figura 5 - Materiais utilizados na fabricação de um Boeing 787 Dreamliner. Fonte: Boeing 787 Dreamliner Specs.

Tabela 2 - Contribuição de materiais no peso de duas aeronaves modernas.

Material	Airbus A350-XWB	Boeing 787
Compósitos	53%	50%
Alumínio e suas ligas	19%	20%
Titânio e suas ligas	14%	15%
Aço e suas ligas	6%	10%
Outros	8%	5%

Fonte: Airbus A350 Specs – adaptado.

Dentre a gama de compósitos existentes, os polímeros reforçados com fibras (PRF) são algumas das estruturas que apresentam maior destaque na aeronáutica. Pelas Figuras 4 e 5, nota-se especificamente a presença destes materiais com destaque para o uso de fibras de vidro e fibras de carbono como reforço, na medida em que estas fibras conferem boas características de rigidez e resistência mecânica e à corrosão, assim como um preço competitivo no mercado (Rezende, 2000).

Dada a importância dos materiais compósitos na aviação e o conhecimento de que algumas estruturas metálicas são indispensáveis (como as ligas de titânio), é fundamental que a integração entre estes dois materiais (metálicos e não-metálicos adjacentes) seja a mais eficiente possível, eliminando o risco de danos estruturais catastróficos. Sendo assim, o estudo e aperfeiçoamento de métodos de união entre PRFs e metais torna-se um importante desafio para a engenharia, sendo então o foco deste trabalho.

3.2 UNIÃO METAL-COMPÓSITO

Compósitos do tipo PRF são superiores aos metais em termos de resistência e rigidez específicas (em relação à densidade mássica), mesmo que as estruturas metálicas apresentem vantagens relacionadas à alta ductilidade e confiabilidade (Matsuzaki, Shibata, & Todoroki, 2008). Dessa forma, muitas estruturas são compostas por metais e compósitos, unidos por algum método específico, com o objetivo principal de somar os benefícios que os dois materiais apresentam isoladamente.

Em algumas situações, métodos puramente adesivos são utilizados para promover a união metal-compósito. Observa-se pelas Figuras 6 e 7, um corte longitudinal de um corpo de prova onde a união entre a chapa metálica (em branco) e o compósito (em cinza escuro) é exclusivamente adesiva. Nestas ocasiões, o custo com a união e o tempo de fabricação da estrutura são amplamente reduzidos (Kim, Lee, & Lee, 1995). Neste método, o excesso de resina oriundo da fabricação (na etapa de laminação) do compósito é utilizado como adesivo entre a superfície metálica e o PRF. Dessa maneira, os processos de união e cura do compósito ocorrem simultaneamente (Matsuzaki, Shibata, & Todoroki, 2008).

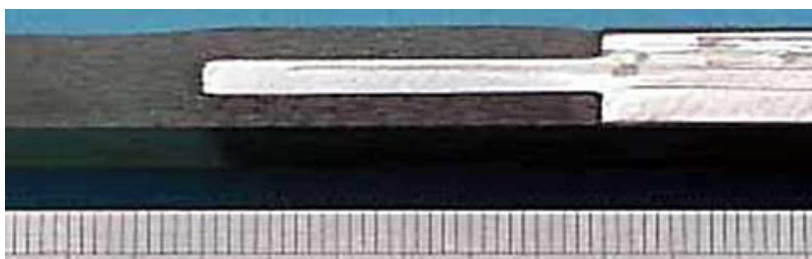


Figura 6 – Junção Metal-Compósito realizada apenas por colagem adesiva. Fonte: Smith, 2004.

Como a união adesiva tem sido muito utilizada pela indústria automotiva e aeroespacial, é fundamental entender quais são os parâmetros que, qualitativamente, influenciam a interface da união. A resistência de uma união adesiva pode ser alterada por fatores como o tipo de resina e a espessura da linha de união. Entretanto, a contaminação superficial (presença de lubrificantes, inibidores de corrosão e óxidos na chapa metálica) e a incorreta preparação superficial e da resina são as principais fontes de comprometimento da ligação adesiva (Alfano, Lubineau, Franco, & Paulino, 2012). Na Figura 8 são ilustrados os vários tipos de juntas adesivas. Para a construção dos corpos de prova do presente trabalho, a junta do tipo “single lap” (sobreposta simples) foi utilizada por sua simplicidade de fabricação.



Figura 7 – Resina aplicada, compactada e curada sobre superfície metálica. Fonte: Gradinger, Ucsnik, & Scheerer, 2011

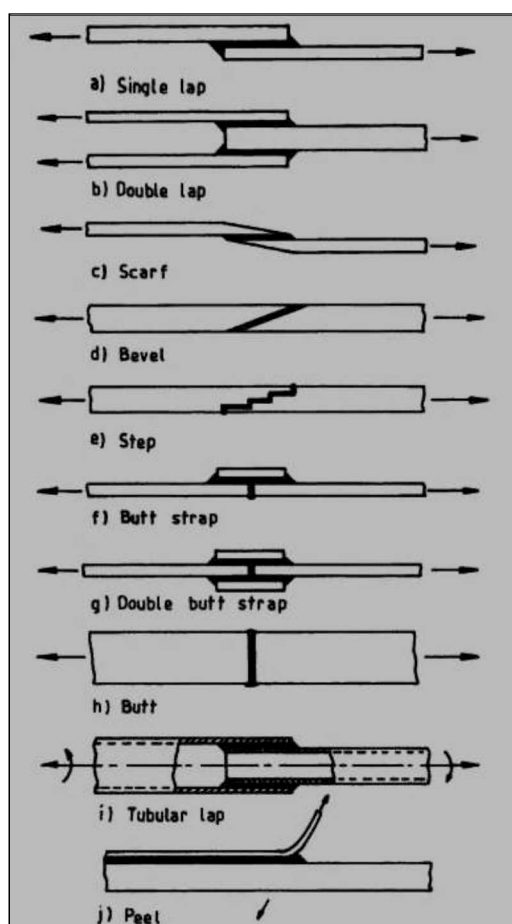


Figura 8 – Tipos de juntas adesivas. Fonte: Adams, Comyn, & Wake, 1997.

Outro método utilizado para união metal-compósito envolve o uso de fixadores mecânicos. Neste caso, estruturas como pinos, rebites, parafusos e porcas garantem a união destes dois materiais. O uso de pinos, parafusos e rebites tem sido alvo de uma série de pesquisas que envolvem a caracterização destes fixadores em termos de resistência estática e dinâmica, distribuição de tensões e mecanismo de falha. A alta elasticidade, simplicidade de uso e facilidade de produção e substituição tornam este método mais utilizado para a fixação entre estruturas. Entretanto, esta técnica apresenta inconvenientes relacionados à destruição das fibras de reforço do compósito, problemas no encaixe dos pinos/parafusos e enfraquecimento da seção transversal devido às concentrações de tensão e amplificação dos furos (Graham, Rezai, Baker, Smith, & Watts, 2014), além, é claro, da necessidade de fabricação de furos prévios, algo que aumenta muito o tempo de produção. Estes prejuízos descritos podem ser corrigidos com a adição de outros elementos mecânicos, porém estes aumentam o peso final da interface de união, fato que não é desejável para estruturas leves (Ucsnik, Scheerer, Zaremba, & Pahr, 2009).

Como uma alternativa, Matsuzaki et al. (2007) introduziu em seu estudo uma fixação híbrida utilizando um novo método de junção que combina um sistema aparafusado e

adesivado após aplicação de resina e analisou experimentalmente a resistência articular. A ligação está representada esquematicamente na Figura 9 e possui união adesiva e mecânica, um esquema desenvolvido para que as fibras de reforço não se danifiquem.

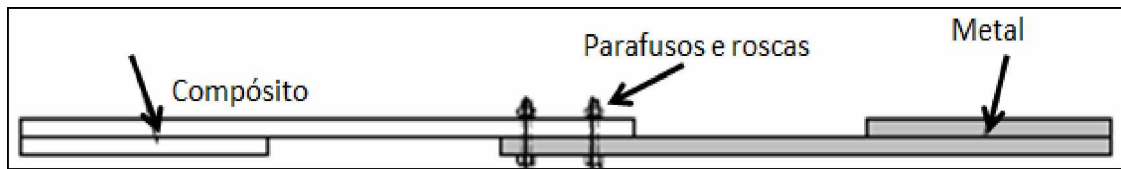


Figura 9 – Chapa de metal unida a painel de compósito reforçado com fibra por adesivagem e fixação mecânica (uso de parafuso e porcas). Fonte: Matsuzaki et al., 2007.

3.2.1 UNIÕES HÍBRIDAS AVANÇADAS UTILIZANDO PINOS

Após a ideia de Matsuzaki et al. (2007), um dos principais métodos híbridos de união metal-compósito desenvolvido usa pequenas protuberâncias metálicas depositadas na superfície do metal, como observado na Figura 10. Posteriormente, é então realizada a laminação do compósito de matriz polimérica reforçado com fibras com aplicação de camadas de fibras e resina e, em sequência, a cura da estrutura. É uma técnica que mistura fixadores mecânicos e união adesiva, acumulando os benefícios das duas formas de união.

Uma gama de potenciais aplicações é percebida para esta modalidade de união, sendo que as indústrias aeroespacial, automotiva, civil e naval se destacam como possíveis empregadoras deste método, principalmente porque a utilização de compósitos permanece em ascensão nestes casos. Aplicar materiais compósitos em estruturas pode reduzir o peso final do objeto em construção e, conseqüentemente, alterar a posição do centro de massa para um local desejado. Esta técnica é frequentemente aplicada em submarinos e aeronaves.

Estas uniões híbridas podem apresentar uma maior resistência mecânica em comparação com juntas puramente adesivas e maior absorção de energia mecânica em caso de falhas se confrontado com juntas apenas com fixadores mecânicos. As características mecânicas deste método híbrido são altamente dependentes da manufatura e da fixação dos pinos na superfície metálica e também da interação destes com o material compósito (Graham, Rezai, Baker, Smith, & Watts, 2014).

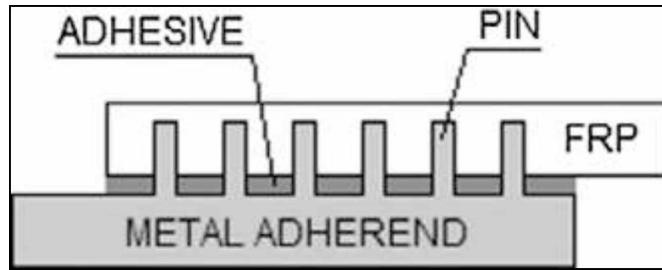


Figura 10 – Vista em corte do modelo de união híbrida, combinando união adesiva (adhesive) sobre o metal (metal adherend) e travamento mecânico (pins) dentro do PRF (FRP). Fonte: Graham, Rezai, Baker, Smith, & Watts, 2014.

A estrutura geométrica dos pinos (Figura 11) é variada de acordo com os parâmetros do processo de deposição de material sobre o substrato metálico, o que é feito por uma variedade de técnicas. Estas técnicas podem ser divididas em duas categorias: Reestruturação de Superfície e Manufatura Aditiva.



Figura 11 – Algumas formas de pinos para união híbrida. Em sequência: cilíndrico (esquerda), cabeça piramidal (meio) e cabeça redonda (direita).

A técnica de Reestruturação de Superfície (Earl, Hilton, & O'Neill, 2012) envolve a criação de regiões altas e baixas ao longo da superfície do metal utilizado através da redistribuição do material em uma determinada área da superfície. A Figura 12 mostra uma imagem MEV de pinos de aço inoxidável de duplo passo com o tratamento de superfície. Pode-se ver que, para cada progação, há um furo ou fenda correspondente no metal. Trata-se de um processo que apresenta bom comportamento mecânico (Figura 13), entretanto não é completamente vantajoso na medida em que possui altos custos de fabricação (envolvendo feixe de elétrons ou laser para redistribuir material na superfície), baixo controle da geometria dos pinos (Figura 14) e danos excessivos à superfície do material (Graham, Rezai, Baker, Smith, & Watts, 2014).

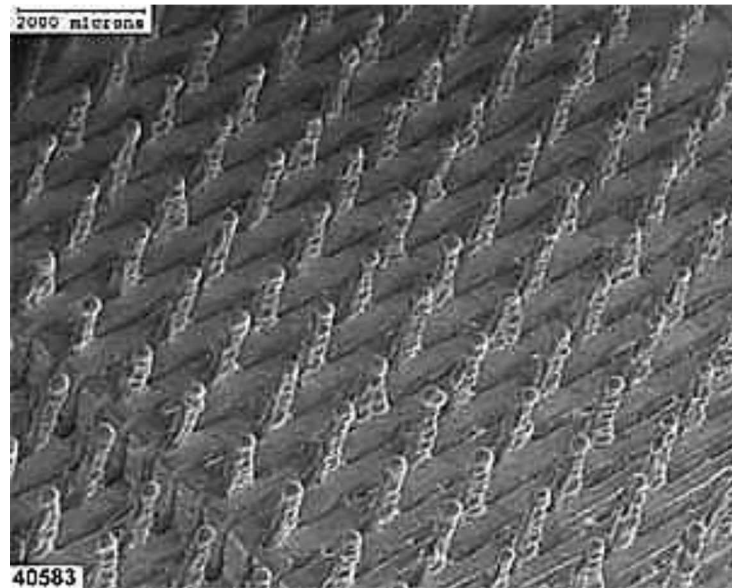


Figura 12 – Sequência de pinos depositados pela técnica de Reestruturação de Superfície. Fonte: Smith, 2004.

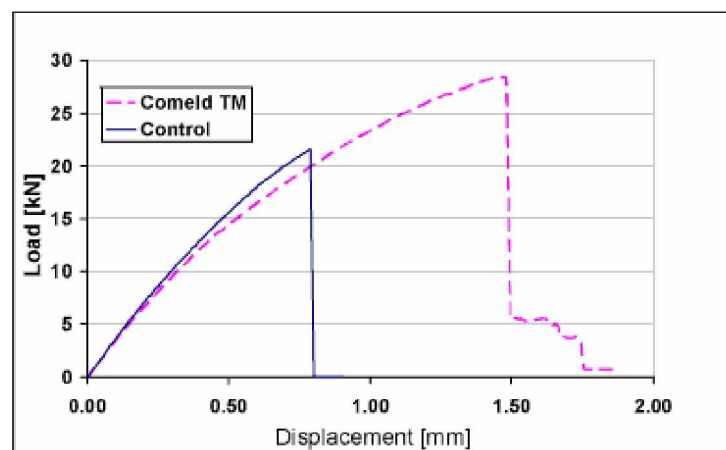


Figura 13 – Curva de carga versus deslocamento para amostras com pinos fabricados por Reestruturação de Superfície (Comeld TM) e para amostras apenas com colagem adesiva (Control). Fonte: Smith, 2004.

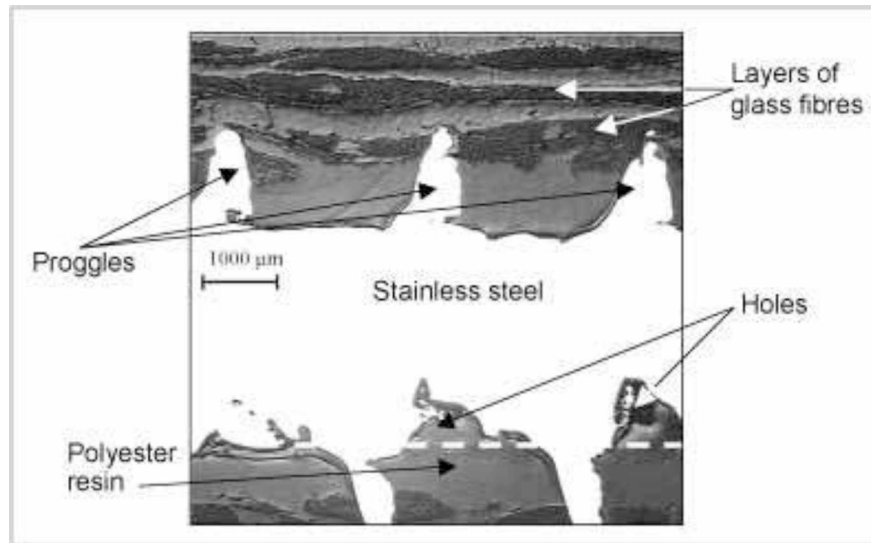


Figura 14 – Em detalhe a geometria dos pinos fabricados por Reestruturação de Superfície (imagem de radiografia). Fonte: Smith, 2004.

A técnica de Manufatura Aditiva parte do princípio de construção de estruturas protuberantes a partir da deposição sequencial de material ao substrato. Métodos baseados no processamento de pó metálico permitem um razoável controle da geometria do pino e não causa prejuízos à superfície do material. As metodologias SLM (Selective Laser Melting) e LMD (Laser Metal Deposition) são conhecidas e consistem na fusão, com uso de laser focalizado, de camadas de pó de material no substrato (SLM) ou jateamento de metal em pó no ponto de foco do laser, também sobre a superfície do metal (LMD). Apesar de apresentar bons resultados, o uso de laser se torna extremamente caro para aplicações industriais (Graham, Rezai, Baker, Smith, & Watts, 2014).

Como uma outra alternativa ainda dentro da Manufatura Aditiva, a Soldagem por Arco Elétrico com Gás de Proteção (GMAW ou MIG/MAG) aparece como uma opção para a deposição dos pinos na medida em que o processo CMT (Cold Metal Transfer) é aplicado. Nessa técnica, pequenos arames metálicos são soldados na superfície do metal desejado, dando origem aos fixadores mecânicos necessários para as juntas híbridas. É um processo eficiente em termos de produtividade e custo (Ucsnik, Scheerer, Zaremba, & Pahr, 2009). A Figura 15 retrata como o uso de uniões híbridas é vantajosa em relação a juntas puramente adesivas (Control) se comparada as características mecânicas. Nota-se uma diferença expressiva na tensão máxima suportada pelas amostras, sendo que aquelas com juntas híbridas suportam maiores cargas. Este fato foi observado tanto para utilização em chapas de alumínio (A1) como de titânio (T1), o que permite concluir que este comportamento é válido para chapas de metais em geral.

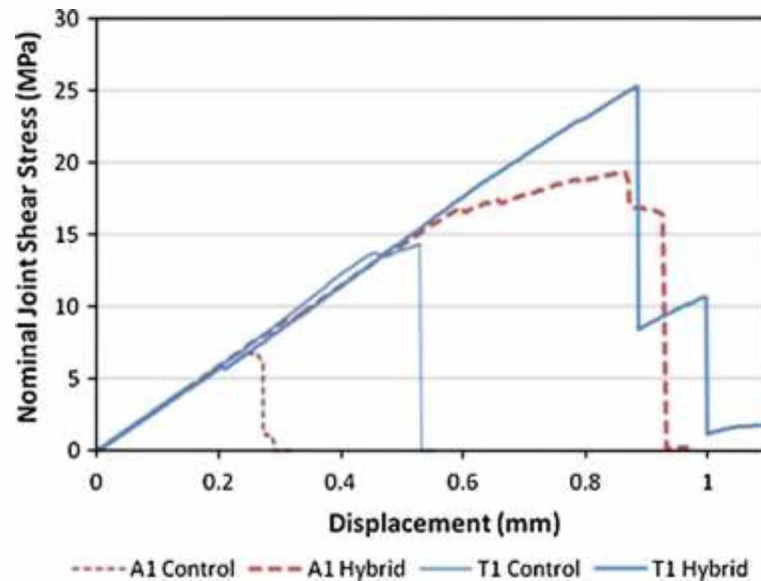


Figura 15 – Curva tensão versus deslocamento para amostras de juntas metal-compósito adesivas (Control) e com pinos (Hybrid) aplicadas em chapas de Alumínio (A1) e Titânio (T1). Fonte: Graham, Rezai, Baker, Smith, & Watts, 2014

O método conhecido como Stud Welding também é bastante vantajoso em termos de custo e tempo de manufatura para produção de pinos em larga escala. Neste caso, pequenos pinos ou parafusos são soldados na superfície metálica por meio da ação de um arco elétrico e também pode ser utilizado para uma grande variedade de metais. A limitação está na dimensão dos pinos utilizados, que variam sua altura geralmente entre 6 e 30 mm (Graham, Rezai, Baker, Smith, & Watts, 2014).

Todos os benefícios encontrados no uso de juntas híbridas foram alcançados com uma observação importante: ganho de peso líquido virtualmente nulo em relação às juntas onde apenas a colagem adesiva foi aplicada (Graham, Rezai, Baker, Smith, & Watts, 2014). O uso de juntas híbridas pode ainda significar uma redução de peso quando comparado às juntas adesivas, já que o aumento da eficiência e resistência mecânica pode levar à uma redução do tamanho dos pinos e da quantidade de resina utilizada como adesivo.

Foi constatado por Matsuzaki et al., em 2008, que a presença de fixadores mecânicos alteram o mecanismo de propagação da falha em juntas metal-compósito quando também há fixação adesiva. Neste mesmo estudo, observou-se que primeiramente a junta de fixação sofre uma falha da ligação adesiva e posteriormente a fratura pela estrutura mecânica ocorre. Na Figura 16 (a), onde não existem pinos (fixadores mecânicos), a frente de falha surge na ponta da chapa de alumínio e se direciona rumo à ponta da estrutura de material compósito e gerando o rompimento da fixação adesiva quando atinge este limite. Em oposição, pela Figura 16 (b), onde há a presença de pinos fixadores, a frente de falha aparece também na ponta da chapa de alumínio mas seu deslocamento é interrompido pelos pinos. Posteriormente, outra frente de falha surge, porém na ponta do material compósito e caminha

em direção à ponta da chapa de alumínio, onde encontra a frente de falha previamente interrompida, ocasionando o rompimento da fixação adesiva.

Pela Figura 17, é possível observar o comportamento da tensão versus deslocamento das juntas híbridas (bolted/co-cured joint), adesiva (co-cured joint) e por fixadores mecânicos (bolted joint). Este experimento de tração, também realizado por Matsuzaki et al. 2008, mostra a vantagem que as juntas híbridas apresentam em relação às juntas adesivas, apesar de uma forte semelhança com a união apenas por apenas fixadores mecânicos. Nos resultados de ensaio de fadiga apresentados pela Figura 18, percebe-se a vantagem apresentada pelas juntas híbridas em relação às exclusivamente feitas por fixadores mecânicos, onde o número de ciclos até a falha, representado pela curva S-N, é maior para as junções híbridas. Em ambos os testes, o ensaio realizado era composto por chapa de metal de alumínio e compósito de matriz polimérica reforçada com fibra de vidro.

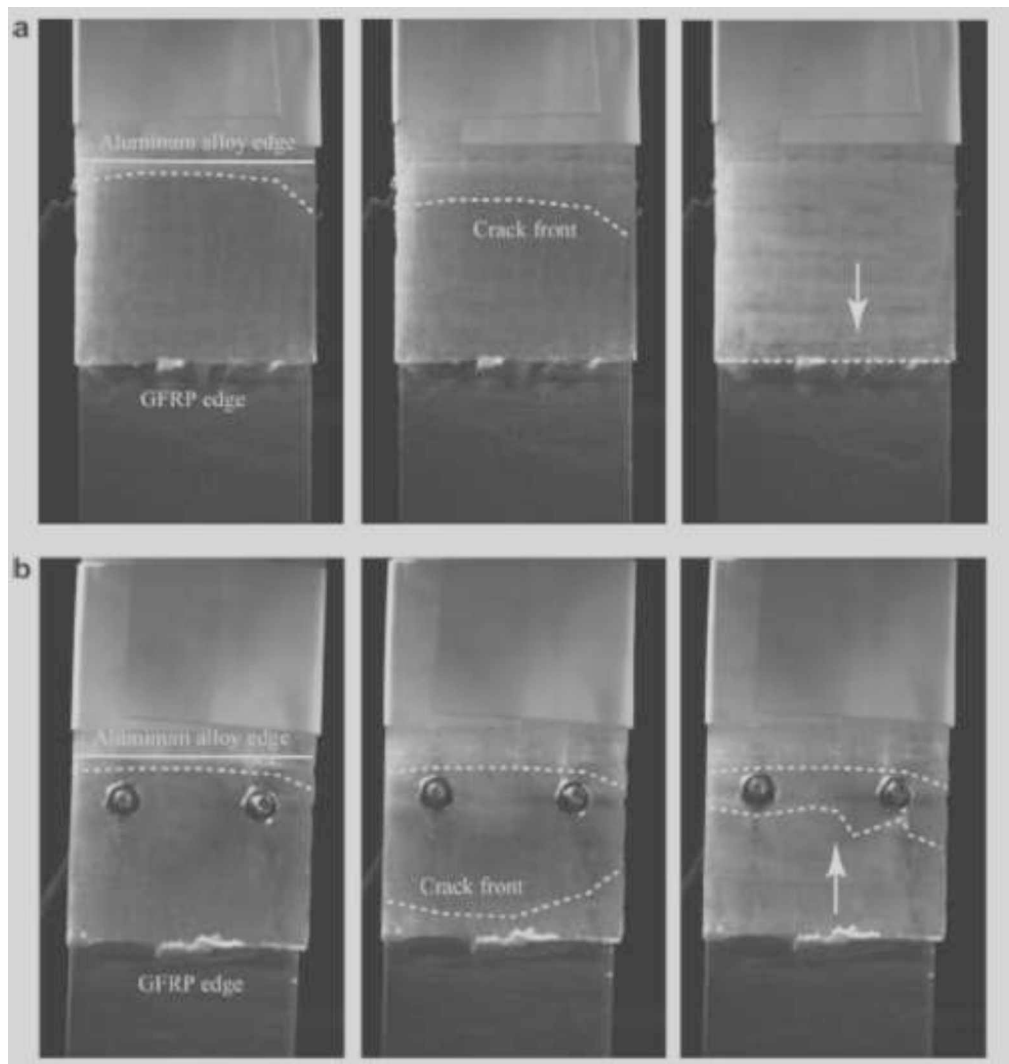


Figura 16 – Direção da propagação da falha em teste mecânico. (a) união apenas adesiva; (b) união híbrida. Fonte: Matsuzaki, Shibata, & Todoroki, 2008

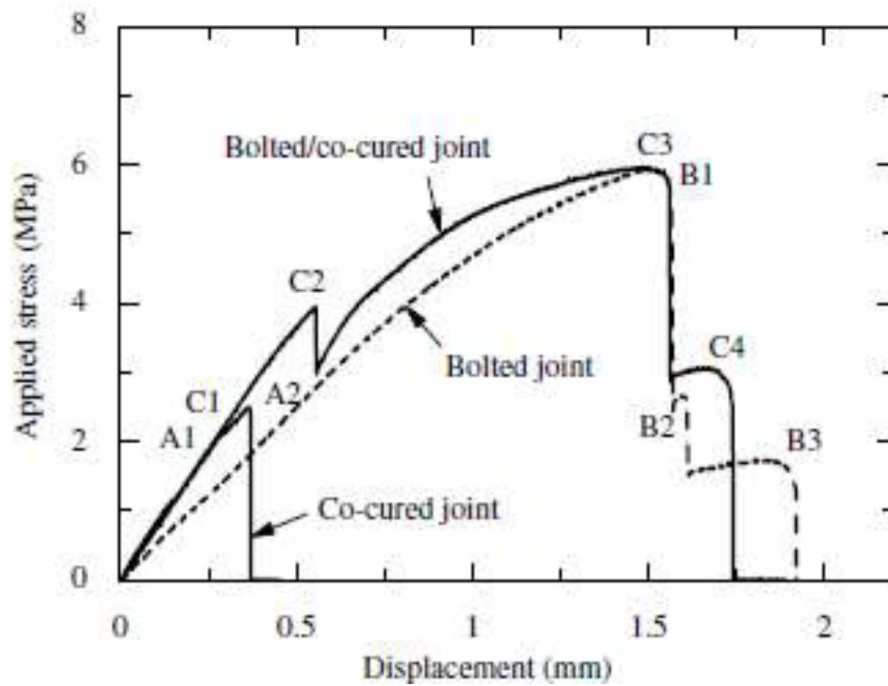


Figura 17 – Curva tensão versus deslocamento para os três tipos de uniões. Fonte: Matsuzaki et al. 2008.

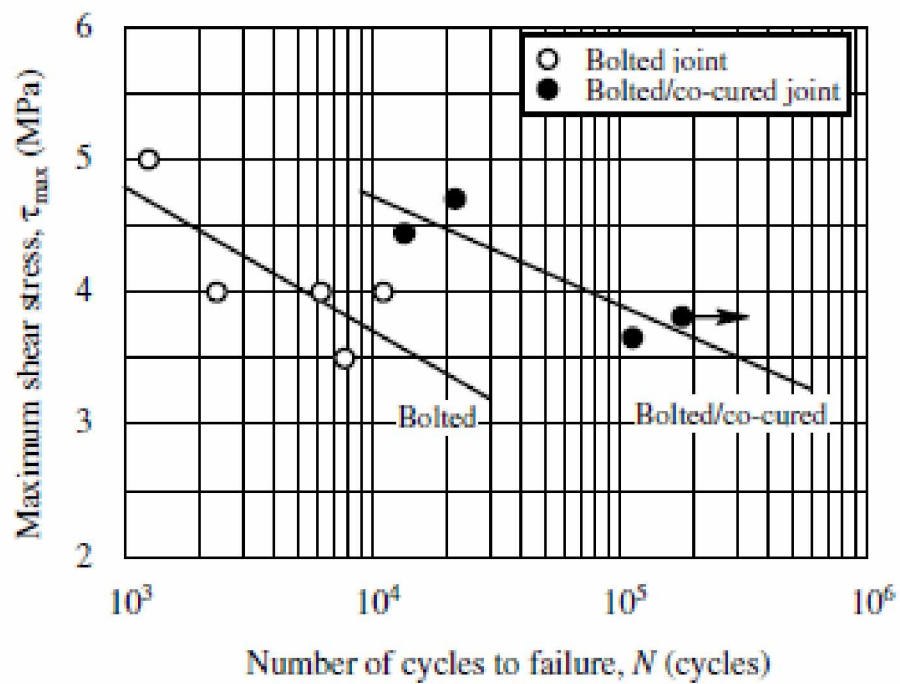


Figura 18 – Curva S-N do ensaio de fadiga para dois tipos de uniões. Fonte: Matsuzaki et al. 2008.

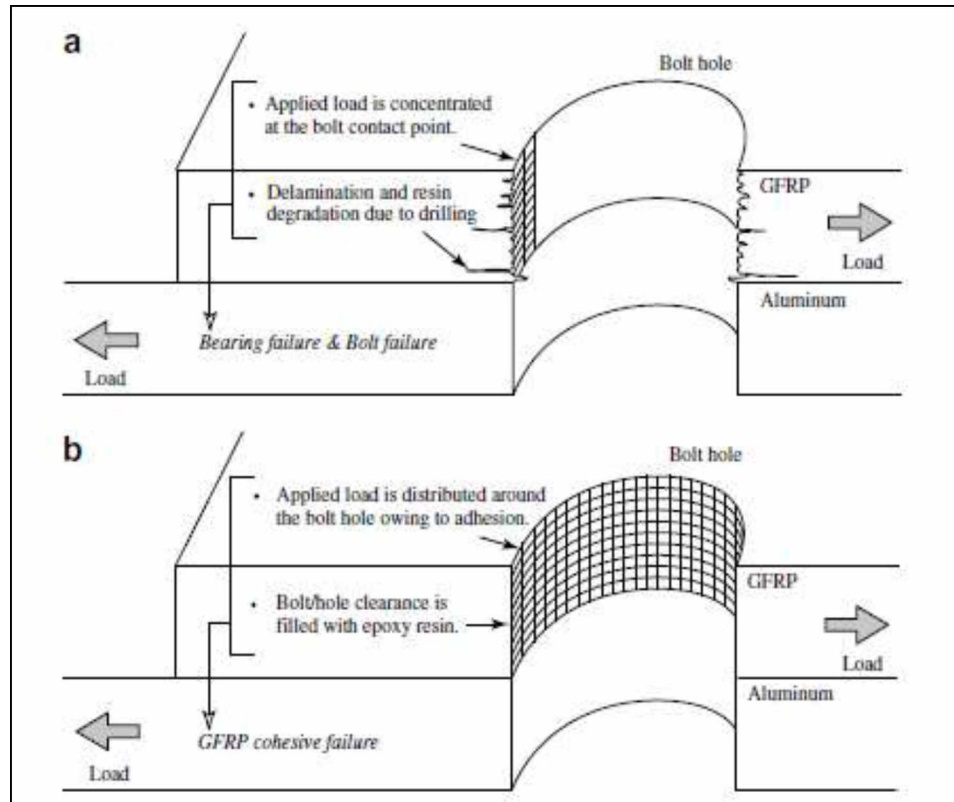


Figura 19 – Ilustração esquemática do mecanismo de falha para: (a) união por fixadores mecânicos e (b) união híbrida. Fonte: Matsuzaki et al, 2008.

A Figura 19 apresenta o mecanismo de falha para uniões híbridas e por fixadores mecânicos. O fixador mecânico suporta a carga aplicada em apenas uma pequena região de contato entre o pino e a estrutura, enquanto na união híbrida esta carga é distribuída por toda a área ao redor do furo onde o pino está localizado. Este fato é explicado pela adesão de resina em todo o pino no momento da cura. Dessa maneira, o maior contato reduz a concentração de tensão nas uniões híbridas e, conseqüentemente, previne/retarda falhas. Ademais, delaminações, degradação de resina e danos nas fibras reforçadoras ocorrem junto aos fixadores mecânicos e podem ser considerados como um dos precursores de danos por fadiga e tensão estática. Sendo assim, juntas híbridas apresentam melhor desempenho mecânico que as alternativas por fixadores mecânicos e por colagem adesiva isoladamente (Matsuzaki et al, 2008).

O bom desempenho mecânico em adição com o bom custo-benefício em termos de fabricação tornam as juntas híbridas um fundamental alvo de estudo para a engenharia moderna, podendo impactar em uma série de avanços para a indústria aeronáutica, automobilística, naval, dentre outras. Dessa forma, faz-se necessário um grande avanço científico no sentido de caracterizar e aperfeiçoar este tipo de união, analisando uma série de parâmetros que podem afetar a junta qualitativamente. Dentre os vários parâmetros, aqueles de influência majoritária são o formato e a quantidade dos pinos utilizados. Já os com efeitos

minoritários, destacam-se o ângulo de inclinação dos pinos, distribuição dos pinos e pré-tratamento superficial do metal (Ucsnik S. , 2014). Neste trabalho, o objeto de estudo será exatamente o ângulo de inclinação dos pinos soldados, já que não se encontra dados quantitativos da influência deste fator e nem explicações dos motivos para seu efeito apenas marginal na resistência de juntas híbridas metal-compósito.

3.3 O PROCESSO DE SOLDAGEM DOS PINOS POR MIG/MAG CMT PIN

A técnica CMT (*Cold Metal Transfer*) é conhecida como uma das várias versões de soldagem MIG/MAG, operando em um modo de transferência metálica por curto-circuito controlado. Aparece com destaque tanto em termos do nível de controle da deposição de material como da capacidade de reduzir o calor aportado à peça. Na dinâmica do processo CMT, um arame-eletrodo é alimentado continuamente e um arco elétrico (protegido por um gás inerte ou ativo) é aberto entre a ponta do arame-eletrodo e o material a ser soldado, como no processo MIG/MAG convencional (Moreira, 2016). A grande diferença entre o processo convencional e o CMT está na tocha de soldagem utilizada. No caso do CMT, esta tocha possui um fluxo reversível de arame-eletrodo (Figura 20) – um sistema de tração variável interno à tocha permite esta característica especial. Ao tocar a poça de fusão, o arame-eletrodo tem o seu fluxo revertido e esta ação permite uma transferência delicada da gota para a poça e sem respingos (desperdício de material). No mesmo instante, a corrente é fortemente reduzida, o que inibe os picos de corrente de curtos circuitos.

Na Figura 20, à direita (de cima para baixo), está a ilustração das principais fases do processo: arco aberto e metal de adição se direcionando para a poça; arame tocando a poça, já com corrente reduzida e arco extinguido; arame com direção revertida e ainda com corrente reduzida; nova abertura do arco e reinício do processo. O termo *Cold Metal Transfer* é utilizado pela curta transmissão de calor para a peça devido ao pequeno arco formado e ao baixo nível de corrente elétrica utilizada, resultando em mínimas zonas termicamente afetadas (Kah, Jibril, Martikainen, & Suoranta, 2012).

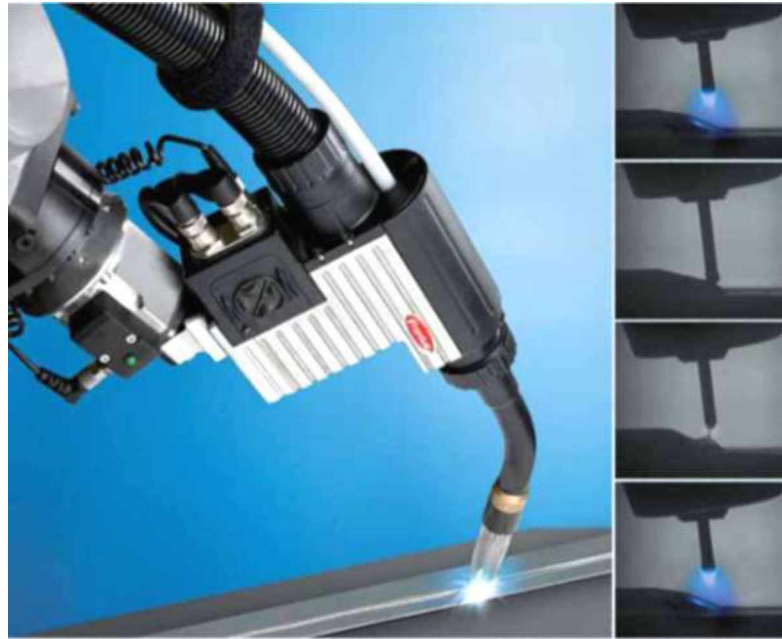


Figura 20 - Tocha diferenciada do processo CMT. Fonte: CMT: Cold Metal Transfer, 2016.

Na Figura 21 estão os equipamentos utilizados para o processo de deposição de pinos por soldagem MIG/MAG CMT. Descritivamente são eles: (1) fonte; (2) painel de controle remoto; (3) rack; (4) controlador do robô; (5) alimentador de arame; (6) tocha especial com reversão de movimento do arame; (7) “pulmão”; (8) metal de adição na forma de arame. O aparelho conhecido como “pulmão” é o instrumento que impede a dobra do arame-eletrodo durante as reversões de movimento. Como a velocidade de recuo de arame oriunda da tocha se opõe à velocidade de avanço de arame oriunda do alimentador, o “pulmão” permite a compensação dessa diferença de velocidade e consequente acúmulo de arame entre o alimentador e a tocha.

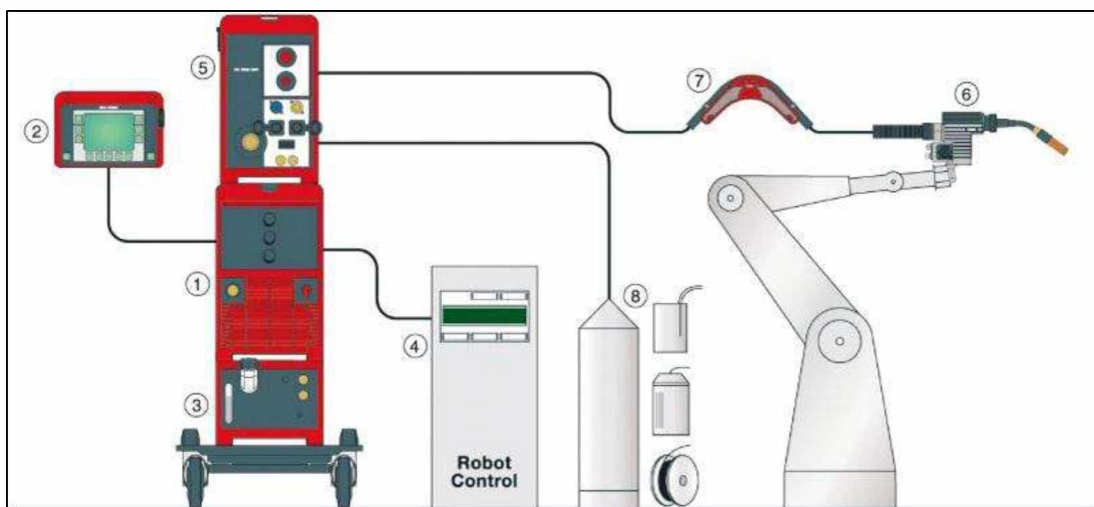


Figura 21 - Ilustração de equipamentos para o processo de soldagem MIG/MAG CMT. Fonte: Fronius International, 2016.

No contexto da soldagem de pinos, o processo de soldagem CMT utilizado é o CMT PIN, que consiste em basicamente três etapas fundamentais: aquecimento, resfriamento e moldagem dos pinos. Durante a fase de aquecimento, o arame-eletrodo é soldado na chapa de metal base. Na etapa de resfriamento, o arame se solda à chapa. Na fase de moldagem, quando aplicada uma corrente, a resistência elétrica é maior na zona de máxima temperatura e, conseqüentemente, o aquecimento ôhmico também é maior nessa área específica. Além do aquecimento, o arame tem seu fluxo revertido e é puxado mecanicamente da chapa. Este processo ocasiona o rompimento do arame na região mais aquecida (mais amolecida), à uma determinada distância da interface chapa-pino e moldando a geometria de acordo com os parâmetros de controle de soldagem (Wittwer & Enzinger, 2011). A Figura 22 ilustra duas dentre as possibilidades de geometria dos pinos.

Externamente à região soldada, o restante da chapa metálica não é afetado por zonas de calor, permanece intacta e não é enfraquecida por nenhum deslocamento de massa em seu volume (Ucsnik, Scheerer, Zaremba, & Pahr, 2010). O processo CMT PIN aparece como um dos processos de deposição de pinos mais razoáveis na literatura, tanto em termos de custos como em eficiência mecânica (Graham, Rezai, Baker, Smith, & Watts, 2014).



Figura 22 – Pinos soldados por MIG/MAG CMT PIN. (a) Pinos cilíndricos; (b) Pinos de cabeça abaulada. Fonte: Ucsnik, Scheerer, Zaremba, & Pahr, 2009.

Diante das características identificadas da deposição de pinos por soldagem MIG/MAG CMT PIN, este processo será utilizado para a soldagem dos pinos para produção de uniões híbridas em juntas metal-compósito. Os parâmetros de soldagem e os materiais utilizados são descritos adiante.

4 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Levando em consideração as referências bibliográficas, potencialidades acerca do assunto e os materiais disponíveis no âmbito da UFU, foram produzidos doze corpos de prova para avaliação da influência da inclinação dos pinos como ancoradores em uniões híbridas entre metais e compósitos. Foram utilizadas três inclinações distintas para fabricação e, após os testes, os resultados foram comparados com valores obtidos na literatura para inclinação nula dos pinos. Em cada caso, quatro CP's foram fabricados.

4.1 DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS

Para a fabricação dos corpos de prova foram utilizados os seguintes componentes fundamentais:

- chapas metálicas retangulares de aço ABNT 1020, com dimensões de 250 mm de comprimento por 60 mm de largura por 1,5 mm de espessura;

As chapas de aço foram cedidas pelo LAPROSOLDA – UFU e estão ilustradas abaixo pelas Figuras 23 e 24.

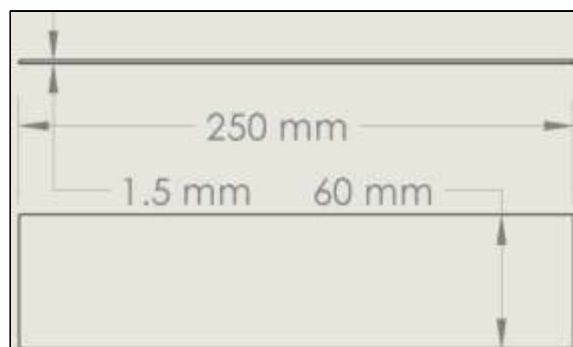


Figura 23 – Representação em cotas da chapa de aço utilizada na fabricação dos CP's.



Figura 24 – Chapa de aço devidamente identificada.

- arame-eletrodo cobreado (Figura 25), também fornecido pelo LAPROSOLDA – UFU, classificação ER70S-6 com 1,0 mm de diâmetro;



Figura 25 – Arame de solda MIG/MAG ER70S-6. Fonte: (Ferramentas Gerais).

- tecido reforçador de Fibra de Vidro (Figura 26) de densidade 200g/m² – Tipo E – Trama tipo Plain Weave, cedido pelo professor orientador;



Figura 26 – Modelo de tecido do tipo Plain Weave de Fibra de Vidro. Fonte: Sercel.

- adesivo para laminação Maxi Rubber e catalisador MEK (Figura 27), adquirido pelos alunos envolvidos na pesquisa.



Figura 27 – Adesivo (resina) para laminação utilizado.

4.2 TRATAMENTO SUPERFICIAL DA CHAPA METÁLICA

Uma primeira tentativa de fixação dos pinos por soldagem CMT PIN foi realizada sobre as chapas de aço sem nenhum acabamento superficial (os metais encontravam-se parcialmente cobertos de óxidos e lubrificantes semiplásticos - graxa). Mesmo com a remoção da graxa, o resultado obtido (Figura 28) foram soldas extremamente enfraquecidas, nas quais os pinos se soltavam com pouco, ou quase nenhum esforço.

Em soma, Alfano et al. (2012) definiu uma série de fatores considerados comprometedores para a qualidade da ligação adesiva entre metais e compósitos. Dentre eles, destacam-se a presença de lubrificantes e óxidos na chapa. Sendo assim, foi considerada essencial a realização de um tratamento superficial da chapa de aço a fim de remover tais contaminações e garantir soldagem e adesivagem eficientes.

Antes do processo de tratamento superficial, as chapas de aço foram cortadas pela metade para garantir um melhor manejo das mesmas nos processos posteriores. Este processo ocorreu no LPM-UFU, utilizando uma serra de fita vertical, modelo RMF 400 e fabricante ROMARFRA. Desse modo, as chapas de aço adquiriram um comprimento de aproximadamente 125 mm e os valores de espessura e largura foram mantidos (Figura 29).



Figura 28 – Pinos com solda enfraquecida se soltaram da superfície. Destaque para a presença de óxidos na chapa.



Figura 29 – Chapa de aço cortada pela metade e pronta para o início do processo de tratamento superficial.

Para a remoção dos óxidos foi utilizada um disco de desbaste abrasivo, modelo SMT 619 Extra – Grão 80 (Figura 30), da fabricante Klingspor. A lixadeira e o disco foram cedidos

pelo LAPROSOLDA – UFU. Para remoção de outras possíveis impurezas da chapa após o lixamento, uma limpeza com acetona (propanona) foi realizada. A chapa de alumínio preparada para a etapa de soldagem é observada na Figura 31.



Figura 30 – Disco de desbaste abrasivo utilizado.



Figura 31 – Chapa de aço após tratamento. Detalhe para a região tratada à direita (onde houve deposição de pinos) e a não tratada à esquerda.

4.3 SOLDAGEM DOS PINOS

Para a soldagem dos pinos na chapa metálica, foram utilizados o robô de soldagem *MOTOMAN HP20* e a fonte *FRONIUS TPS5000CMT*, ambos instalados nas dependências do LAPROSOLDA – UFU e apresentados na Figura 32.



Figura 32 – À esquerda a fonte *FRONIUS TPS5000CMT* (1) e o robô *MOTOMAN HP20* (2). À direita o painel de controle (*RCU5000*) e monitoramento dos parâmetros de soldagem da fonte. (Moreira, 2016)

Para a fixação de todo conjunto da mesa de soldagem, foi utilizado um suporte constituído de uma placa de aço com furos igualmente espaçados, sobre a qual a chapa metálica de aço foi colocada e fixada com o uso de parafusos, porcas, arruelas e chapas auxiliares. O esquema de fixação é ilustrado pela Figura 33.

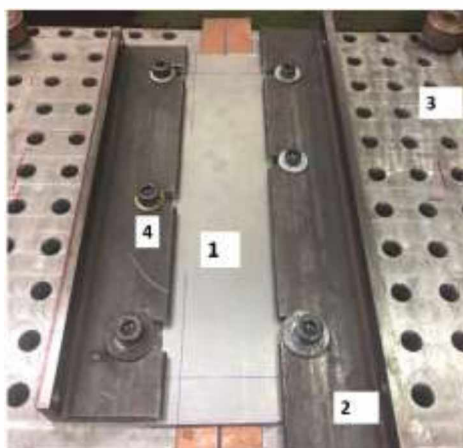


Figura 33 – Fixação de chapa de aço (1) no suporte de aço (3) com uso de chapas auxiliares (2) e conjuntos de porca, parafusos e arruelas (4).

Foi utilizado o programa de soldagem sinérgico DB0875 que permitiu a deposição de pinos de arame com 1,0 mm de diâmetro e do tipo cabeça abaulada. Neste programa, apenas

duas opções são disponíveis para ajuste de geometria dos pinos por parte do usuário, são elas: “*Altitude Adaption*” que permite a regulação da altura do pino (parâmetro que possui variação de -30 à +30) e “*Ball/Cyl. Adaption*” correspondendo a relação entre pino de cabeça abaulada ou cilíndrica (parâmetro que varia entre +5.0 e -5.0, onde o valor mais positivo representa o maior abaulamento). Os valores dos parâmetros adotados, apresentados na Tabela 3, foram baseados em trabalho anterior (Skhabovskyi, Gartner, Rodrigues, Reis, & Scotti, 2015) e foram escolhidos para obter uma altura de pino aproximada de 3,0 mm e diâmetro de cabeça de 1,3 mm.

Ressalta-se que os demais parâmetros que também influenciam na geometria dos pinos obtidos pela técnica CMT PIN foram fixados, tais como DBCP (Distância Bico de Contato-Peça), gás de proteção e vazão de gás. A composição química do gás de proteção foi aferida com o analisador comercial de gás *Oxybaby®*. A vazão do gás de proteção foi confirmada com o uso de um fluxômetro (bibímetro – calibrado). A Figura 34 apresenta o conjunto tocha e pinos soldados, com ênfase para um pino com inclinação nula.

Tabela 3 - Parâmetros de soldagem utilizados no processo de deposição dos pinos.

DBCP	Gás de Proteção	Vazão do gás	Alt. Adaption	Ball/Cyl. Adaption
6 mm	Ar + 3,6% CO ₂	8,9 l/min	-30	+1.0

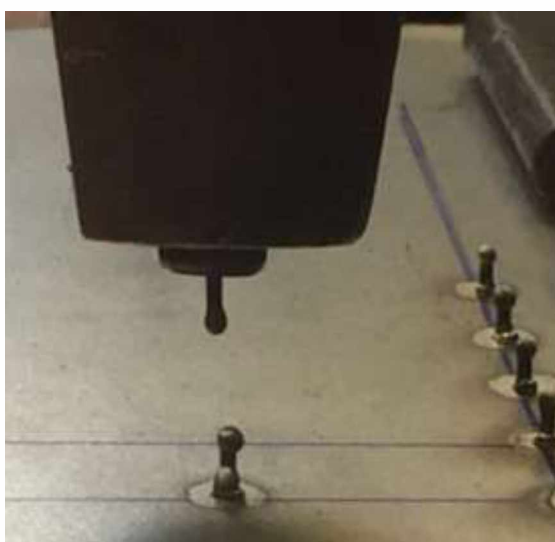


Figura 34 – Ilustração do padrão geométrico de pino obtido.

Como o objetivo do presente estudo é a verificação da influência da inclinação dos pinos na junção híbrida, foram escolhidos arbitrariamente três distintas angulações de pinos para fabricação, mas que não fossem muito grandes a ponto atrapalhar a colocação do tecido de fibra de vidro para laminação do compósito. Os ângulos aplicados foram padronizados em

15°, 25° e 35° e foram sempre considerados em relação ao eixo perpendicular da chapa, conforme a Figura 35.

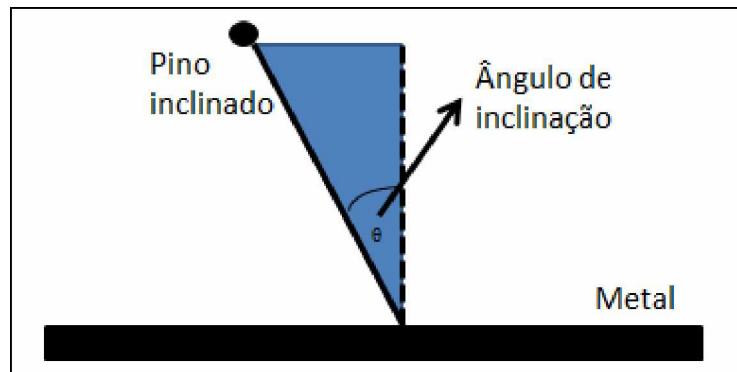


Figura 35 – Representação do pino soldado com ângulo de inclinação.

Para garantir a inclinação uniforme dos pinos, a mesa de suporte (na qual as chapas de aço foram fixadas) foi inclinada com os ângulos descritos acima e, a fim de garantir os valores requeridos, foi utilizado um transferidor Mitutoyo para medição. A Figura 36 ilustra a inclinação da mesa de suporte.



Figura 36 – Transferidor sendo utilizado para medição da inclinação da mesa de suporte.

Após a inclinação da mesa, parafusos, roscas e chapas auxiliares foram utilizadas para a fixação da mesa de suporte de aço, conforme Figura 37. A razão da escolha em inclinar a mesa de soldagem foi pela facilidade em se programar o robô de soldagem apenas uma vez, em termos de espaçamento de deposição, e depois apenas inclinar o plano da mesa de trabalho para o robô atuar.

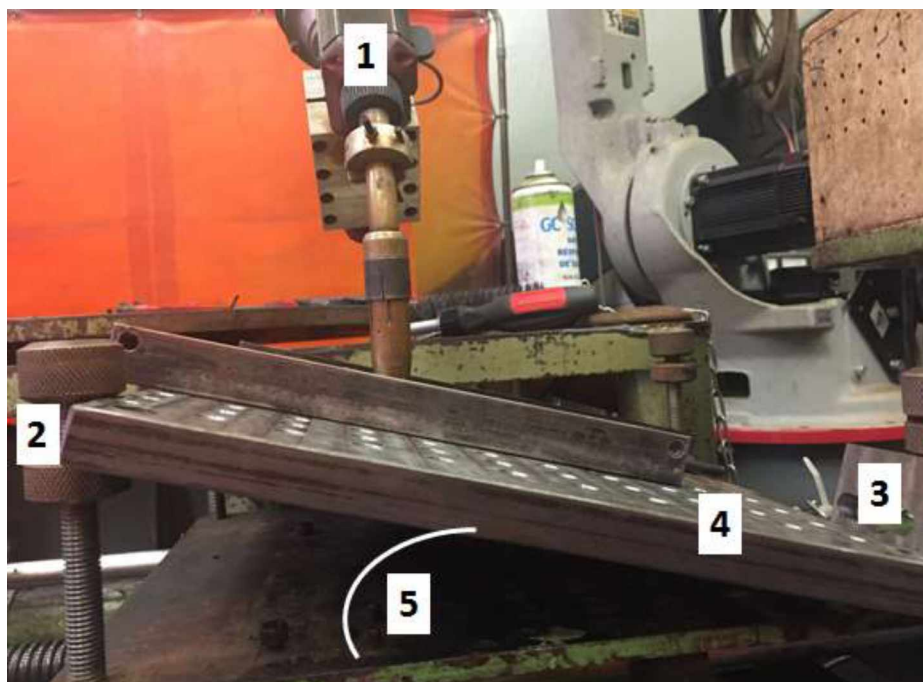


Figura 37 – Representação da inclinação da mesa de suporte para deposição dos pinos. (1) Tocha de soldagem na posição vertical (2) Parafusos e roscas fixando a mesa (3) Chapas auxiliares fixando a mesa (4) Mesa de suporte em aço (5) Ângulo de inclinação (15° , 25° ou 35°)

Para este estudo, foram soldados uma quantidade de 6 pinos, igualmente espaçados entre si (distância de 20 mm) a partir de um ponto inicial à 20 mm da borda inferior e 10 mm da borda lateral da chapa de aço (Figura 38). Foram fabricados quatro corpos de prova de cada angulação para as posteriores análises. Os pinos foram soldados com inclinação contrária ao sentido da força a ser exercida pelo compósito no futuro teste de tração.

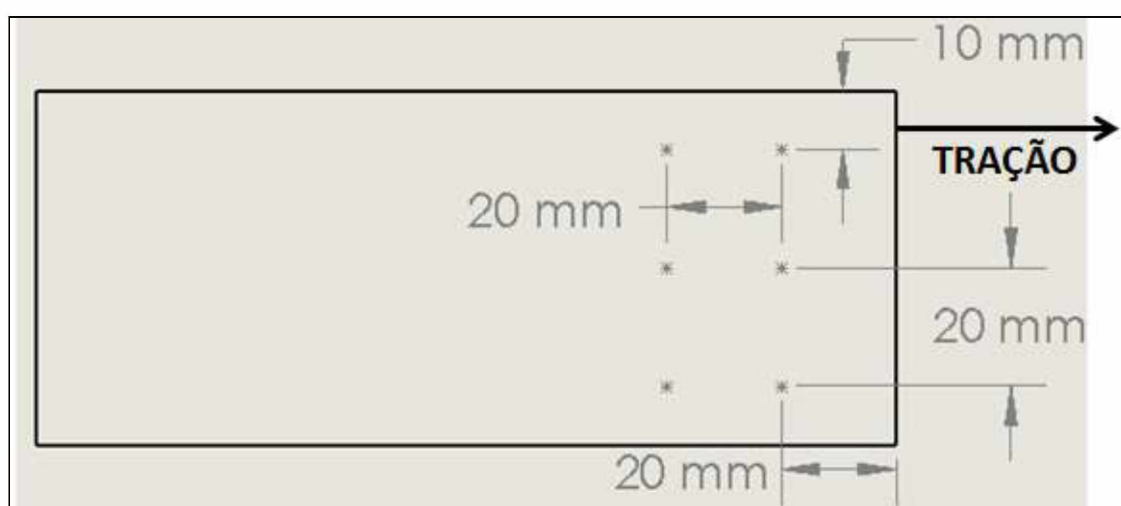


Figura 38 – Representação geométrica das posições de soldagem dos pinos.

4.4 LAMINAÇÃO DO COMPÓSITO

Após o processo de soldagem dos pinos inclinados na chapa metálica, as etapas de laminação com manta de fibra de vidro e consequente aplicação de resina foram realizados. Um piso de porcelanato de 50x50 cm, revestido de cera desmoldante, foi utilizado para a disposição das chapas de aço conforme a Figura 39. Chapas auxiliares devidamente enceradas com desmoldante também foram usadas como suporte para apoiar a aplicação do conjunto resina e fibra de vidro e manter o conjunto nivelado. Para a otimização do tempo de produção, a laminação foi realizada concomitantemente em seis corpos de prova dispostos lado a lado, conforme as Figuras 40 e 41.

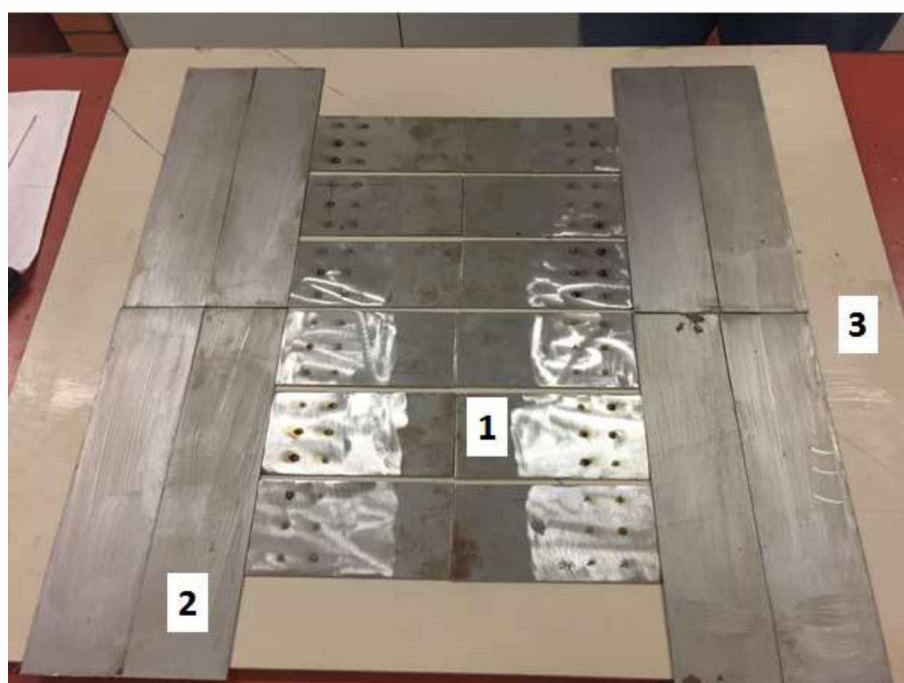


Figura 39 – Disposição das 12 chapas de aço com pinos soldados (1). Nota-se o uso de 8 chapas auxiliares (2) e do porcelanato (3), ambos devidamente encerados com desmoldante.

O processo se iniciou com a aplicação de resina com pincel sobre toda a superfície do conjunto das chapas onde seria formado o compósito. Em seguida, a manta de fibra de vidro foi posicionada e teve os pinos de aço atravessados em sua espessura. Um rolo de pintura foi então passado por todo este conjunto permitindo que sua espuma forçasse a penetração dos pinos, além de que, na medida em que o processo de aplicação de resina e deposição de fibra se repetia, facilitava a compactação das camadas de fibra. Em soma, cuidado especial foi remetido às regiões próximas aos pinos e uma espátula foi utilizada para pressionar as camadas junto aos pinos, tentando garantir efetiva compactação. Como o processo foi feito manualmente, tentou-se ao máximo evitar que bolhas de ar ficassem presentes no material. Para isso, aplicou-se uma leve pressão durante a passagem do rolo no processo. Para

garantir uma maior homogeneidade no processo, todas as amostras tiveram sua etapa de laminação realizada pela mesma pessoa. No total foram adicionadas dez camadas de fibra de vidro, com o objetivo de alcançar uma espessura de material compósito similar à espessura da chapa de aço e também buscando cobrir todos os pinos com material compósito.

Após a laminação, os corpos de prova foram reservados em espaço adequado no LAPROSOLDA – UFU onde a resina aplicada passou pelo processo de cura à temperatura e pressão ambiente por aproximadamente 24 horas.

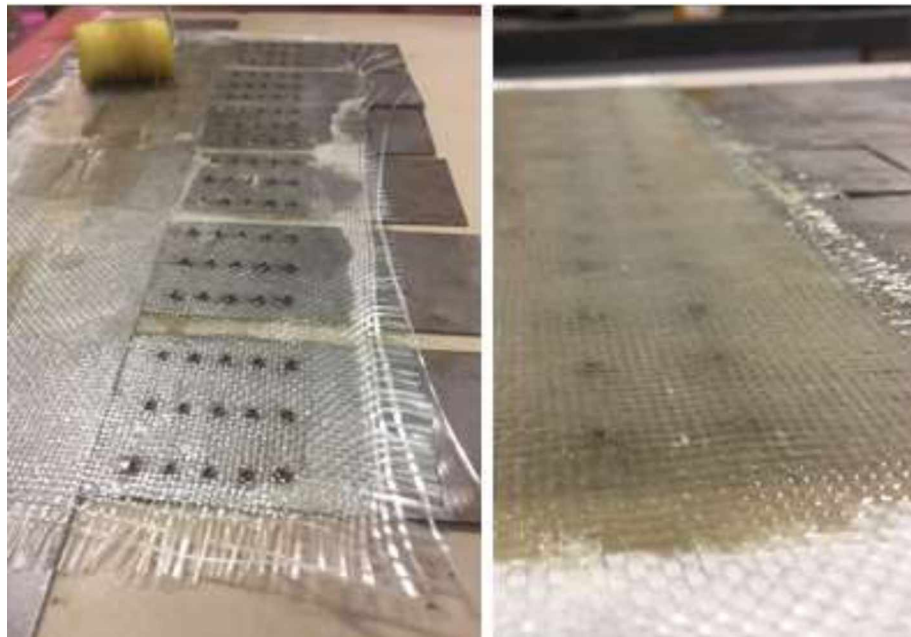


Figura 40 – Aplicação de resina e manta de fibra de vidro. À esquerda, primeira camada de fibra de vidro e resina sendo pressionada pelo rolo de pintura (Franzoni, 2017). À direita, várias camadas de fibra de vidro laminadas.



Figura 41 – Disposição final das doze estruturas em dois blocos de chapas de aço mais pinos mais compósito.

4.5 CORTE E ACABAMENTO FINAL DOS CORPOS DE PROVA

Após a cura, os corpos de prova foram delimitados e marcados para o processo de corte (Figura 42). No LPM-UFU, os blocos de chapas de aço mais pinos mais compósito foram cortados utilizando uma serra de fita vertical, modelo RMF 400 e fabricante ROMARFRA, sendo assim separados em doze CPs distintos. Destaca-se que nesta etapa, apenas o compósito que unificava todos os CPs foi cortado (Figura 43).

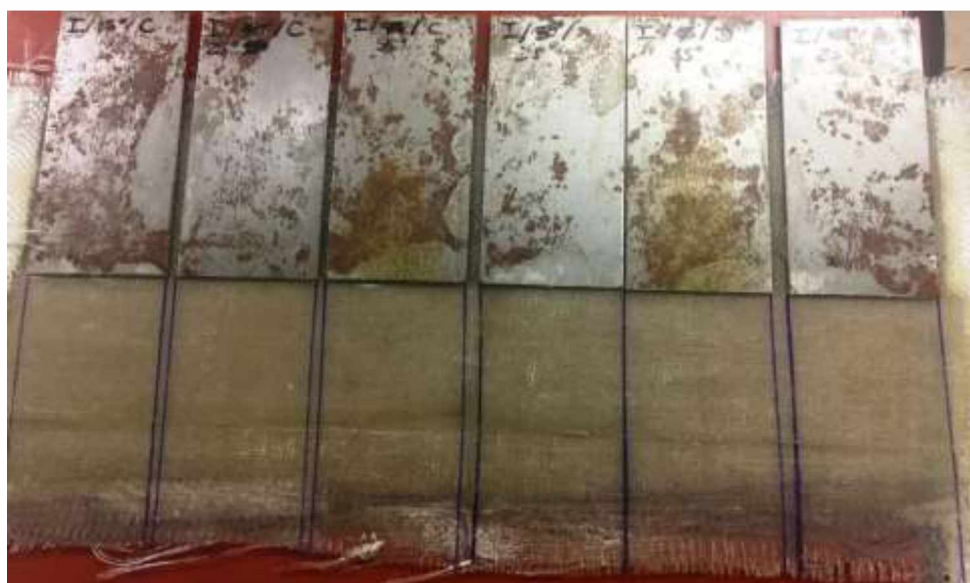


Figura 42 – Corpos de prova marcados e delimitados após a cura.

Após o corte, foi realizado o acabamento dos CPs com o objetivo de deixar suas laterais alinhadas e paralelas. Para isto, foi utilizado uma lixa “Pano Metal A40 - Carborundum”. Tal processo foi o último necessário para a finalização dos doze CPs que, na sequência, foram avaliados em ensaio mecânico.



Figura 43 – Corte do material compósito, separando os CPs.

Ao final do processo, os corpos de prova fabricados apresentaram um comprimento médio de $215,1\text{ mm}$. A extensão da parte exclusivamente metálica foi de aproximadamente $41,5\text{ mm}$, região esta destinada para a fixação das garras da máquina de tração. A região preenchida pela junta híbrida (pinos + adesivo) compreendeu uma extensão de cerca de $82,9\text{ mm}$. O restante da extensão dos CPs é então uma região constituída apenas por material compósito, de um comprimento que variou em torno de $90,7\text{ mm}$. A Figura 44 apresenta as dimensões médias encontradas.

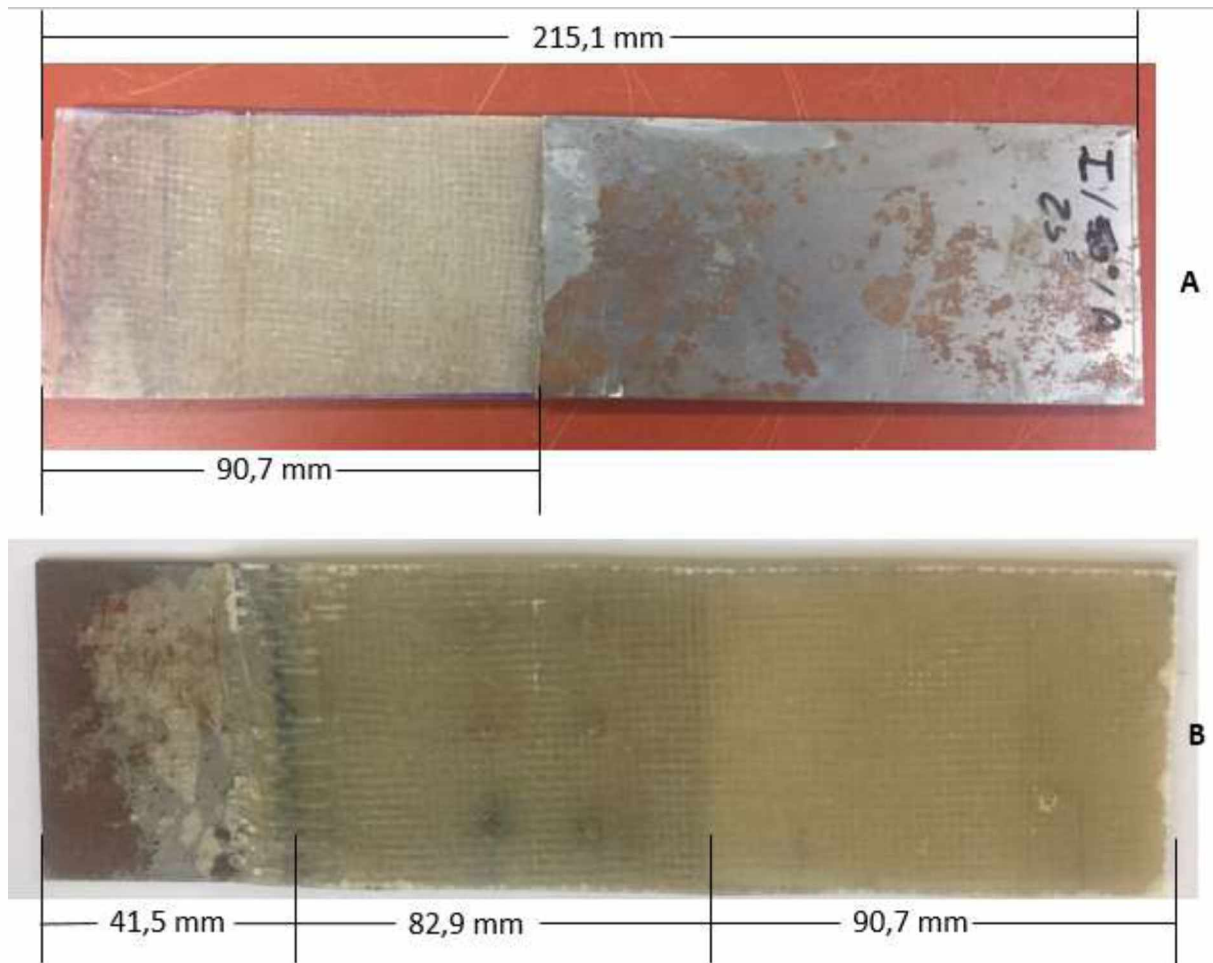


Figura 44 – Exemplo de corpo de prova após acabamento no material compósito as dimensões médias obtidas para cada segmento.

Pela Figura 45 é possível observar a região da junta híbrida de forma aproximada. Vale destacar a uniformidade da região de interface do compósito e chapa metálica, a espessura da camada de fibra de vidro que cobriu totalmente os pinos inclinados presentes.

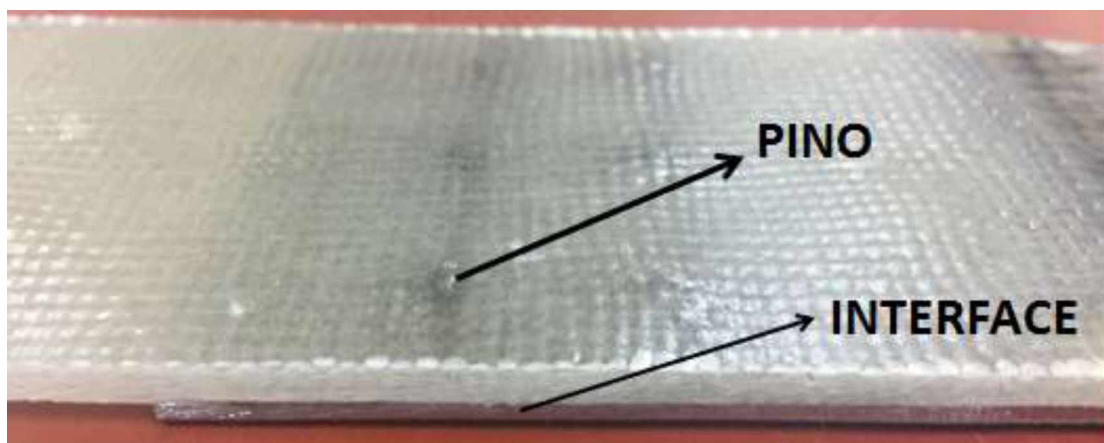


Figura 45 - Visão lateral corpo de prova após acabamento evidenciando a interface metal-compósito e sinal dos pinos soldados.

5 AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA - RESULTADOS

A avaliação dos corpos de prova foi realizada em termos de monitoramento do processo de soldagem dos pinos, análise de massa dos corpos de prova antes e após a soldagem dos pinos e testes de tração nas juntas híbridas para caracterização mecânica. Todas as atividades de avaliação foram executadas à temperatura ambiente (em torno de 28°) e detalhes de cada um dos casos são apresentados a seguir.

5.1 MONITORAMENTO DA SOLDAGEM DOS PINOS

O processo de soldagem de pinos CMT PIN foi monitorado e gerou os gráficos expressos pelas Figuras 46, 47, 48 e 49. É possível observar um padrão de repetição nas curvas, o qual representa a deposição de cada pino.

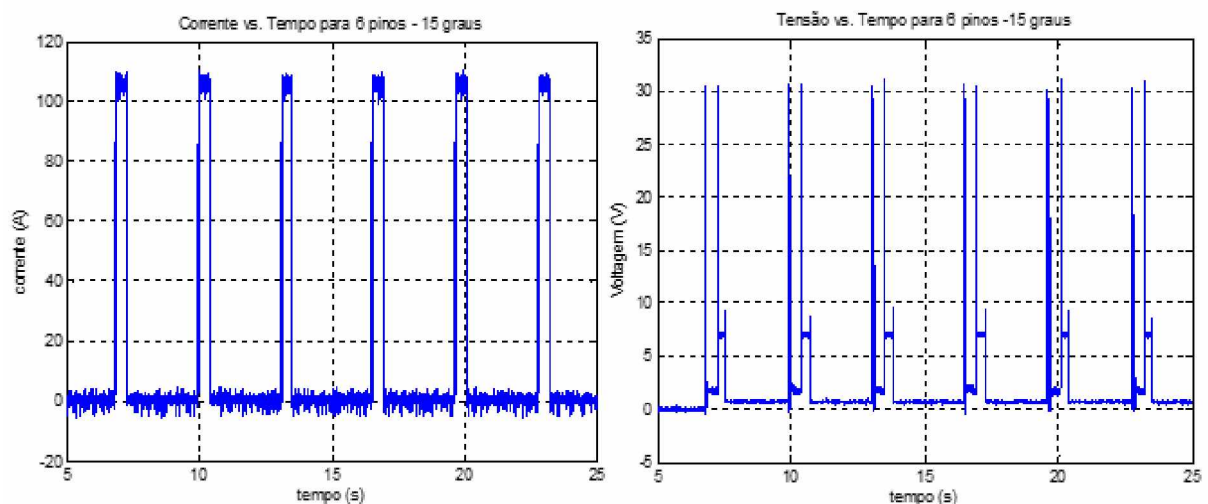


Figura 46 – Representação da corrente (esquerda) e tensão (direita) versus o tempo durante o processo de soldagem CMT PIN para CP's com pinos com 15° de inclinação.

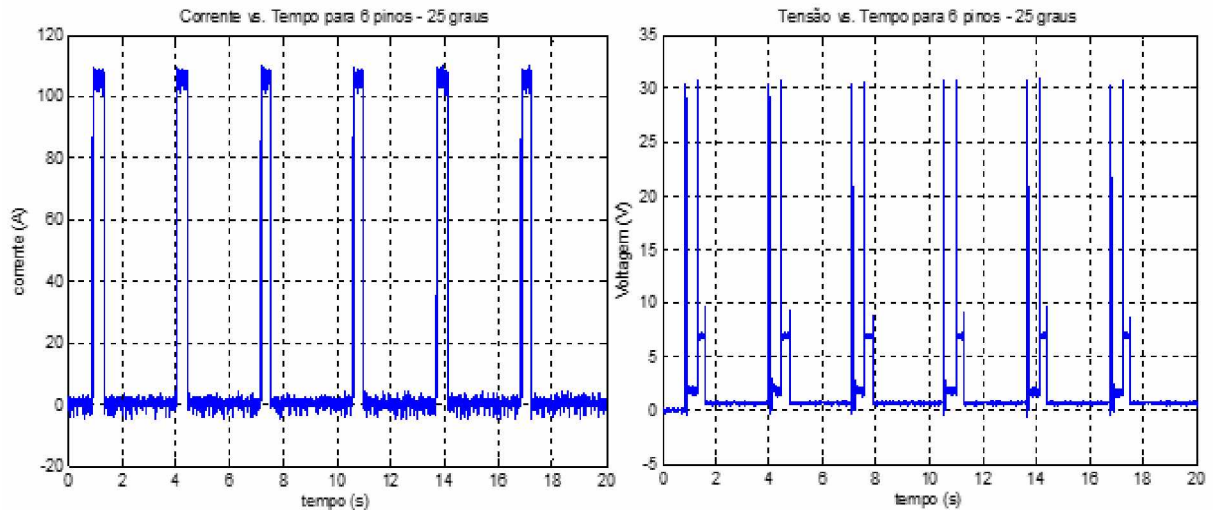


Figura 47 – Representação da corrente (esquerda) e tensão (direita) versus o tempo durante o processo de soldagem CMT PIN para CP's com pinos com 25° de inclinação.

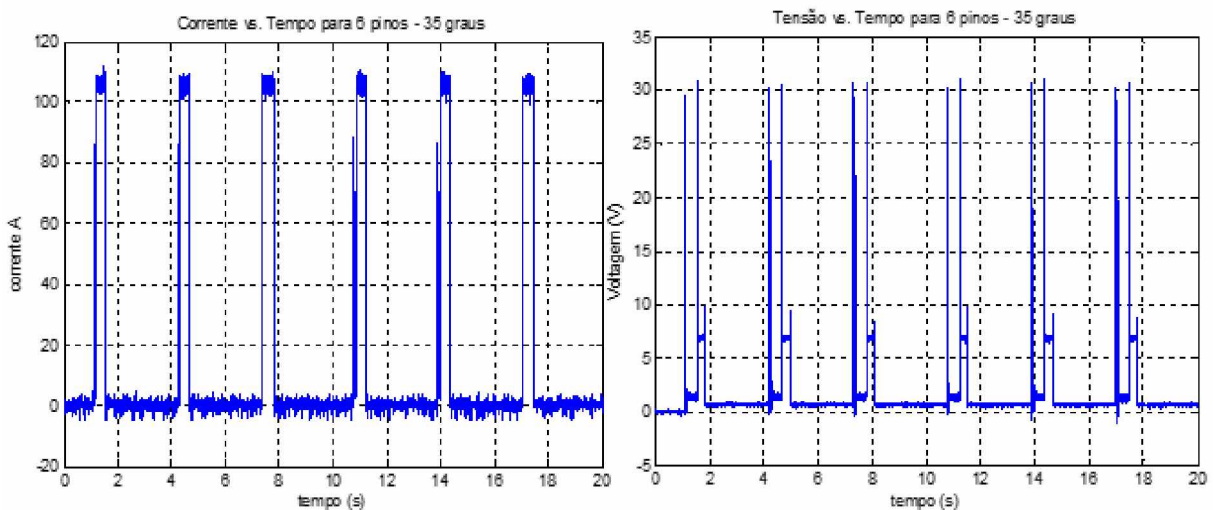


Figura 48 – Representação da corrente (esquerda) e tensão (direita) versus o tempo durante o processo de soldagem CMT PIN para CP's com pinos com 35° de inclinação.

Os gráficos apresentados nas Figuras 46, 47 e 48 apresentam comportamento bastante semelhante, o que permite uma análise aproximada do padrão de repetição observado. Este padrão é ilustrado detalhadamente nos gráficos da Figura 49, onde as fases principais da soldagem podem ser reconhecidas.

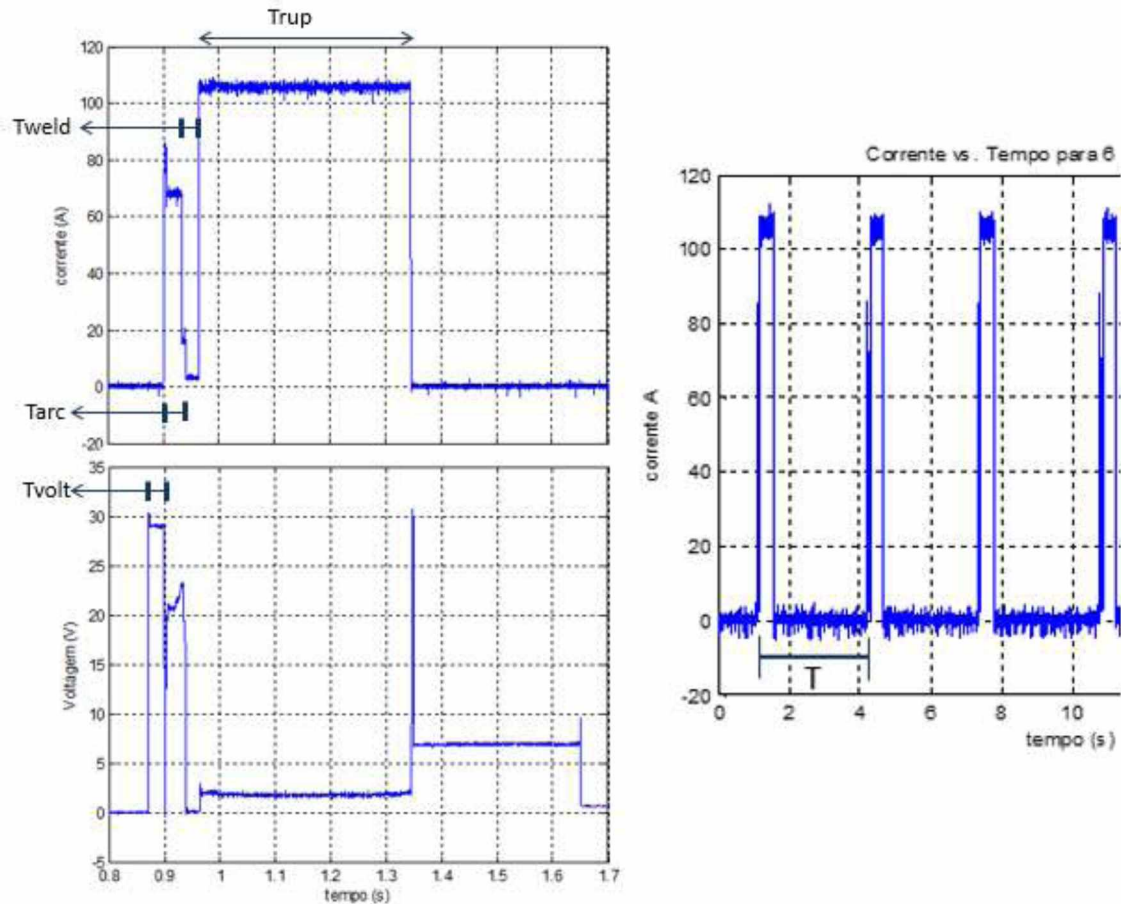


Figura 49 – Detalhe do processo de deposição de um dos seis pinos soldados por CMT PIN à esquerda e apresentação à direita do tempo total (ciclo) de deposição (T).

O ciclo (T) de deposição do pino aparece repetitivamente em um período que está em torno de 3,41 segundos (Figura 49). Este intervalo compreende o tempo gasto na deposição e também aquele necessário para a tocha de soldagem se mover até o próximo ponto de deposição (não otimizado). Detalhadamente na Figura 49, pode ser observado o tempo de aplicação de tensão em vazio ($T_{VOLT} = 0,037s$), tempo de arco aberto ($T_{ARC} = 0,043s$), tempo de soldagem ($T_{WELD} = 0,021s$) e tempo de ruptura do pino ($T_{RUP} = 0,369s$), para o caso específico do CP A com 25° de inclinação de pinos.

As imagens e vídeos do processo de soldagem foram obtidas com o uso de um smartphone modelo iPhone 6 e uma câmera de alta resolução GoPro, afixada na tocha de soldagem de acordo com a Figura 50. Um trecho da sequência de deposição do pino de aço inox na superfície metálica pode ser observada pela Figura 51. Observa-se em A o contato entre o arame-eletrodo e a chapa de aço no instante seguinte à soldagem do pino. Já em B nota-se o processo de aumento de temperatura do arame, ocasionado pelo aumento da corrente elétrica circulante. Em C, após a corrente atingir valor máximo, a temperatura do arame também chega ao seu valor máximo amolencendo o arame. Em D o fluxo do arame é

revertido, rompendo-o no ponto desejado e criando o pino. Em *E* é visto o pino, já formado e com a cabeça abaulada, em processo de resfriamento.

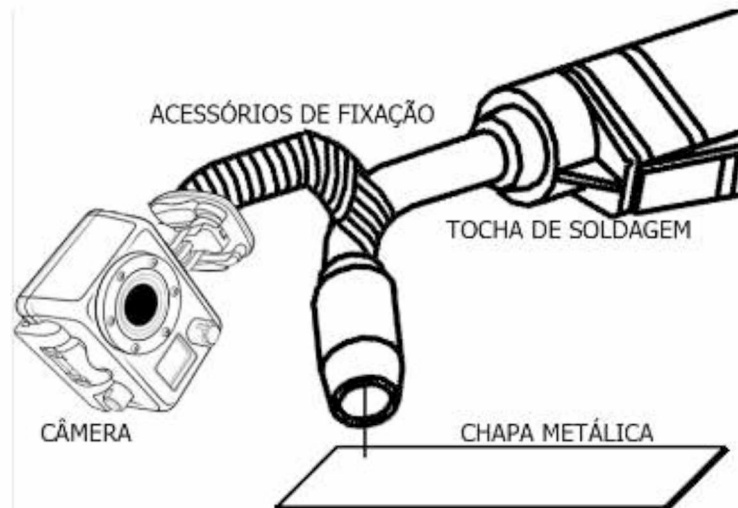


Figura 50 – Esquema de fixação da câmera de alta resolução na tocha de soldagem.

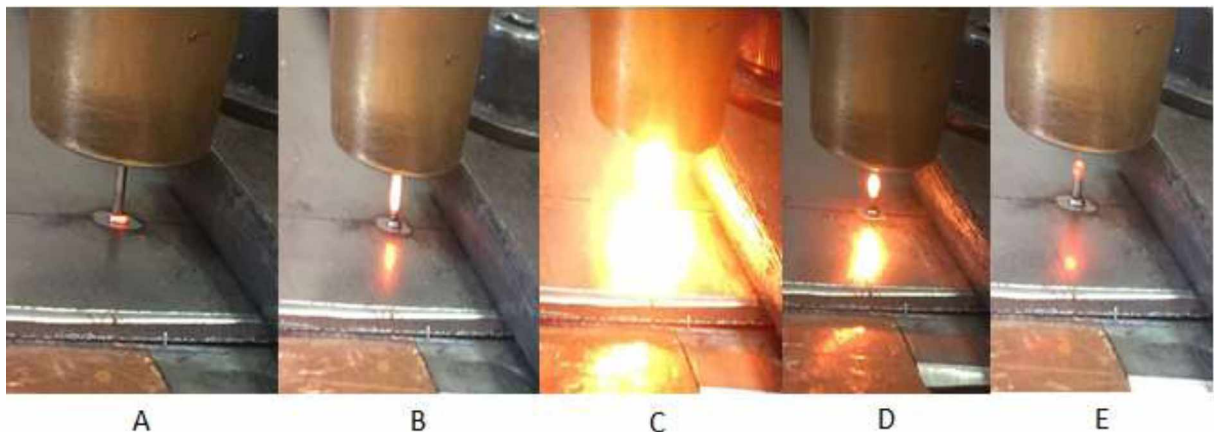


Figura 51 - Sequência de deposição do pino de aço inox na superfície metálica após o fechamento do arco elétrico e da soldagem do arame.

No processo de soldagem dos pinos, foram obtidos quatro corpos de prova para cada inclinação de pino. Uma análise geométrica foi feita avaliando a altura dos pinos e diâmetro da cabeça. A altura dos pinos e diâmetro da cabeça foram medidos com o uso do MICRÔMETRO MITUTOYO PANTEC (Figura 52). Para obtenção do comprimento dos pinos, foi utilizado cálculo básico de trigonometria baseado na altura dos pinos em relação à ao nível da chapa. Para calcular os valores da Tabela 4, em cada inclinação específica, foi realizada a média aritmética das três variáveis expressas para cada pino dos quatro corpos de prova fabricados. Posteriormente, a média geral de altura, diâmetro e comprimento para cada inclinação foi encontrada com a média aritmética dos valores encontrados para cada um dos seis pinos.



Figura 52 – Etapa de medição da altura dos pinos.

Tabela 4 - Dimensões de altura e comprimento do pino e diâmetro da cabeça do pino.

Ângulo	Pinos	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Altura Média (mm)	Comprimento Médio (mm)	Diâmetro Médio (mm)
15°	1	3,1562	1,1750	3,2675	3,1485	3,2596	1,2587
	2	2,9862	1,1375	3,0915			
	3	3,0812	1,1950	3,1899			
	4	3,2537	1,3175	3,3685			
	5	3,0625	1,3650	3,17053			
	6	3,3512	1,3625	3,4694			
25°	1	3,0150	1,2013	3,3267	2,9629	3,2692	1,2822
	2	2,8375	1,1800	3,1308			
	3	2,8450	1,2700	3,1391			
	4	3,0500	1,3175	3,3653			
	5	2,8750	1,3625	3,1722			
	6	3,1550	1,3625	3,4812			
35°	1	2,5000	1,0750	3,0519	2,3979	2,9273	1,0862
	2	2,3625	1,0825	2,8841			
	3	2,4375	1,0850	2,9756			
	4	2,5100	1,1025	3,0641			
	5	2,1375	1,0875	2,6094			
	6	2,4400	1,0850	2,9787			

Pela Tabela 4, observou-se uma certa discrepância entre os valores de médias gerais obtidos pelo processo de fabricação e a dimensões desejadas de acordo com os parâmetros de soldagem. As Figuras 53, 54 e 55 apresentam respectivamente as medidas de altura média, diâmetro médio da cabeça dos pinos e comprimento médio dos pinos para cada grupo de inclinação de pinos e seus respectivos graus de variação de acordo com o desvio padrão. Observou-se que a altura dos pinos reduziu com o aumento da inclinação dos pinos, conforme geometricamente esperado. O diâmetro da cabeça dos pinos e o comprimento dos pinos apresentaram médias similares apenas para inclinações de 15° e 25°, enquanto as medidas para 35° foram discrepantes. Tal variação pode ser justificada exatamente pelas oscilações e variabilidade do processo de soldagem. Apesar dessa variabilidade, considera-se que o padrão geométrico dos pinos obtidos foi razoavelmente uniforme para proceder com a análise mecânica.

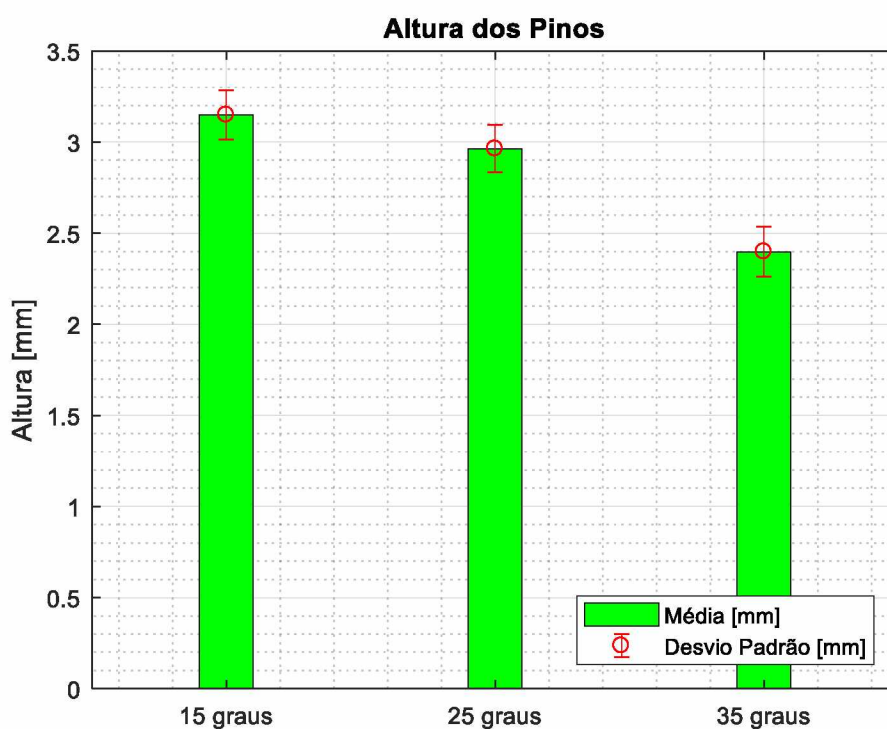


Figura 53 – Gráfico com valores de média e desvio padrão para altura dos pinos.

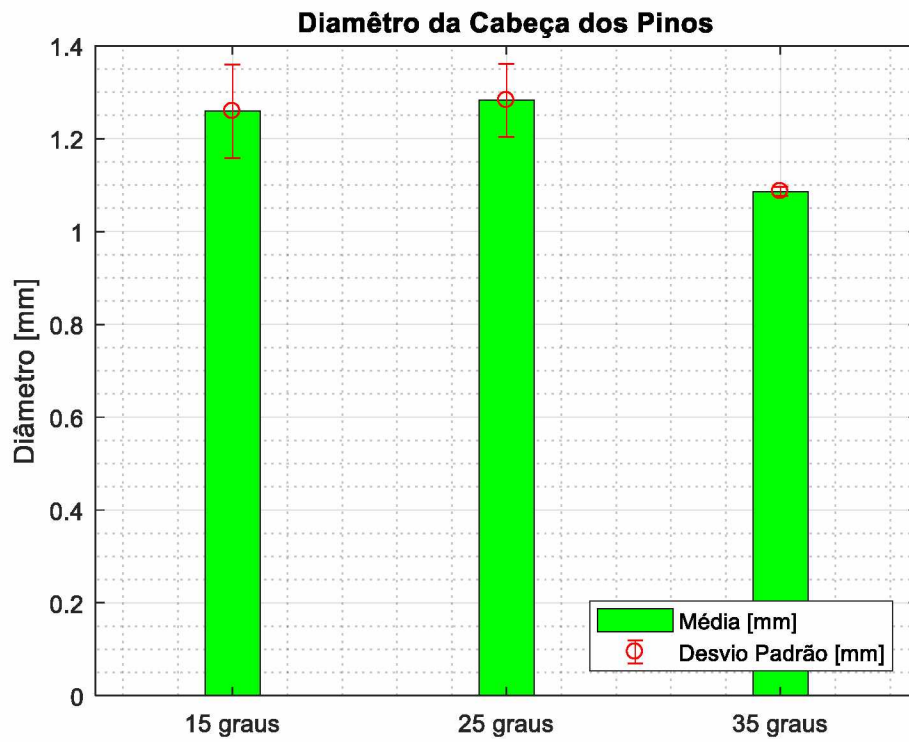


Figura 54 – Gráfico com valores de média e desvio padrão para diâmetro da cabeça dos pinos.

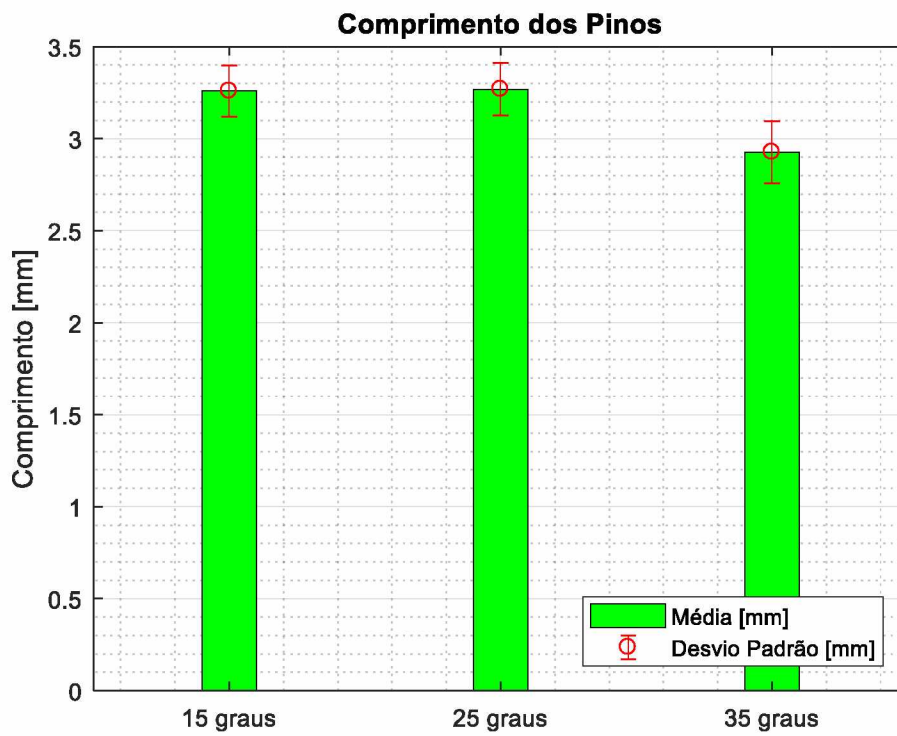


Figura 55 – Gráfico com valores de média e desvio padrão para comprimento dos pinos.

As Figuras 56, 57, 58 e 59 ilustram o processo de deposição de pinos nas chapas de aço.



Figura 56 – Início do processo de deposição dos pinos inclinados. Detalhe para o contato entre chapa, arame de soldagem (pino) e tocha de soldagem.

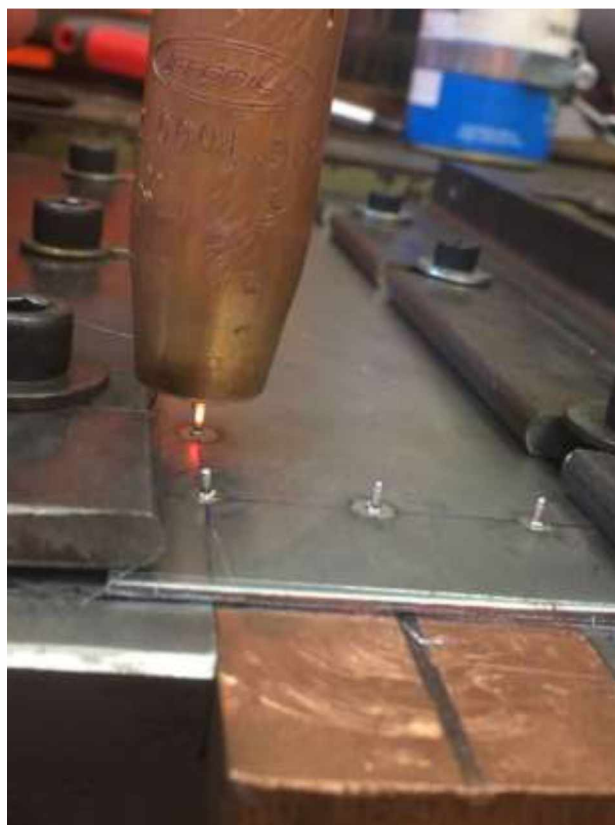


Figura 57 – Deposição da segunda fileira de pinos inclinados.



Figura 58 – Momento de soldagem do pino na chapa metálica.



Figura 59 – Seis pinos inclinados (25 graus) soldados na superfície da chapa metálica.

5.2 ANÁLISE DE MASSA

Após o processo de tratamento superficial e corte, as chapas passaram por um processo de pesagem. Este procedimento também foi realizado após a soldagem dos pinos para efeito de comparação. O objetivo de realizar uma análise de massa das chapas antes e após a deposição dos pinos foi verificar o valor do ganho líquido de peso que, de acordo com Graham et. al. (2014), deve ser próximo de nulo. Sendo assim, utilizou-se uma balança semi-analítica (Figura 60) SHIMADZU modelo UX6200H e com resolução de 0,01 grama e capacidade de até 6200 gramas, pertencente ao LAPROSOLDA-UFU. Os resultados são apresentados na Tabela 5.



Figura 60 – Exemplo de balança similar à utilizada no processo de aferição de massa. Fonte: (Shimadzu - Excellence in Science, 2017)

Tabela 5 – Massa acrescida por pino adicionado, Massa acrescida na chapa e percentual de ganho de massa da chapa, ocasionado pela deposição dos pinos.

	15°			25°			35°		
CP	Massa/ pino (g)	Massa/ chapa (g)	Ganho/ chapa (%)	Massa/ pino (g)	Massa/ chapa (g)	Ganho/ chapa (%)	Massa/ pino (g)	Massa/ chapa (g)	Ganho/ chapa (%)
A	0,03	0,17	0,20%	0,03	0,17	0,20%	0,03	0,15	0,17%
B	0,05	0,32	0,38%	0,04	0,22	0,26%	0,03	0,16	0,18%
C	0,04	0,22	0,26%	0,04	0,21	0,24%	0,02	0,14	0,16%
D	0,03	0,17	0,20%	0,03	0,19	0,22%	0,02	0,12	0,14%

Nota-se que a influência de peso dos seis pinos depositados na chapa de aço é mínima e muito próxima de zero. Este ganho que não ultrapassou um aumento de 0,4% em nenhum corpo de prova, é considerado satisfatório para a continuidade do projeto.

5.3 TESTES DE TRAÇÃO

Dos doze corpos de prova fabricados pelo processo descrito anteriormente, dez foram utilizados para os testes de tração, sendo seis CP's para inclinações de pinos de 15° e 25° (três para cada uma) e quatro CP's para pinos com ângulos de 35°. A razão do uso deste corpo de prova extra para a maior inclinação ocorreu com a finalidade de substituir o resultado de um corpo de prova que apresentou resultados inicialmente duvidosos, mas que

posteriormente teve seu comportamento incluído nas estatísticas. Os outros CPs foram mantidos como reservas. Para a execução dos testes, utilizou-se uma máquina servo-hidráulica MTS 793 disponibilizada no LMest – UFU (Figura 61). Para garantir a adesão dos corpos de prova com a máquina de tração e evitar um possível deslizamento (escorregamento), pequenas lixas foram posicionadas entre as chapas (de compósito e aço) e as garras da máquina de tração. A velocidade do teste de tração programada na máquina foi de 2 mm/mim, conforme estabelece a norma de testes de tração para materiais compósitos (ASTM International, 2014).



Figura 61 – (A) Máquina de tração com o corpo de prova já posicionado; (B) Detalhe da garra fixando a chapa de aço e o compósito; (C) Detalhe do uso da lixa entre compósito e garra.

Durante os testes de tração foi observado o comportamento visual da falha adesiva na junta híbrida. Como visto pela Figura 62, a falha iniciou no bordo inferior da junta, na região próxima à ponta da chapa metálica de aço. A frente de falha então percorreu o espaço preenchido apenas com resina, parando na primeira linha de pinos. A partir deste instante, outra frente de falha se formou no bordo superior da junta metálica, na região da ponta da chapa de material compósito. Esta segunda frente de falha passou a se deslocar também na região preenchida pela resina, até que encontrou com a primeira frente de falha que estava estagnada, completando assim o processo de falha adesiva. Todo este processo, que pode ser visualizado pela sequência de imagens (obtidas por meio de capturas instantâneas da gravação do teste feita por um smartphone modelo *iPhone 6*) da Figura 62, vai de encontro com o que foi apresentado por Matsuzaki et al, ainda no capítulo de revisão bibliográfica desde trabalho. Tal sequência de falha foi percebida nos seis testes onde a gravação de vídeo foi efetuada.

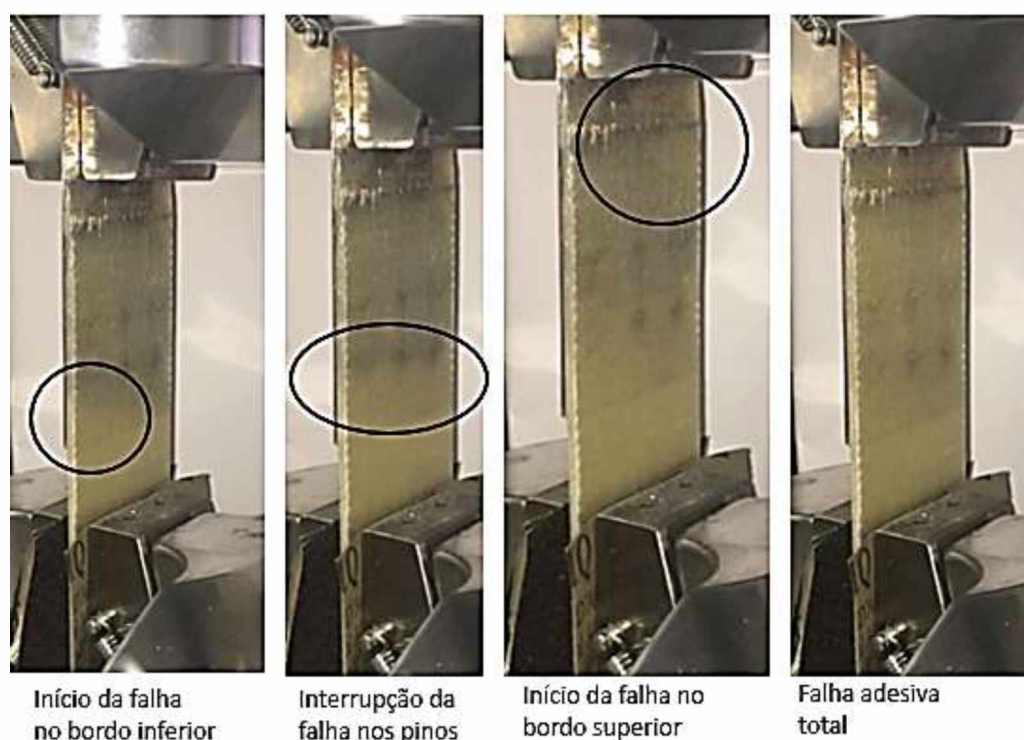


Figura 62 – Sequência de falha adesiva durante o teste de tração.

Do ensaio de tração dos CPs, que na verdade foi um cisalhamento da parte adesiva e uma mistura de cisalhamento e flexão nos pinos, foram captados os valores de carga aplicada e tempo de teste. Com a velocidade de ensaio fixa, foi possível transformar o vetor de tempo do ensaio em deslocamento. Foram identificados pontos referentes à carga máxima suportada, carga de falha adesiva, curva de carga aplicada versus deslocamento e, a partir dela, calculado um parâmetro de rigidez por meio de regressão linear. As Figuras 63 e 64 apresentam as curvas de Força x Deslocamento para os três corpos de prova fabricados com pinos inclinados à 15° e 25° respectivamente. Observa-se pelos círculos dos gráficos a localização das cargas de falha adesivas (L_{AF}) e por um asterisco tem-se as cargas máximas de tração (L_{MAX}) para todos os corpos de prova analisados. Os valores médios para L_{AF} e L_{MAX} são descritos na Tabela 6.

Como os dois materiais possuem coeficiente de Poisson distintos, um ponto de estudo futuro observado é a variação da espessura das chapas com objetivo de encontrar uma relação onde o deslocamento do PRF e do substrato metálico sejam semelhantes.

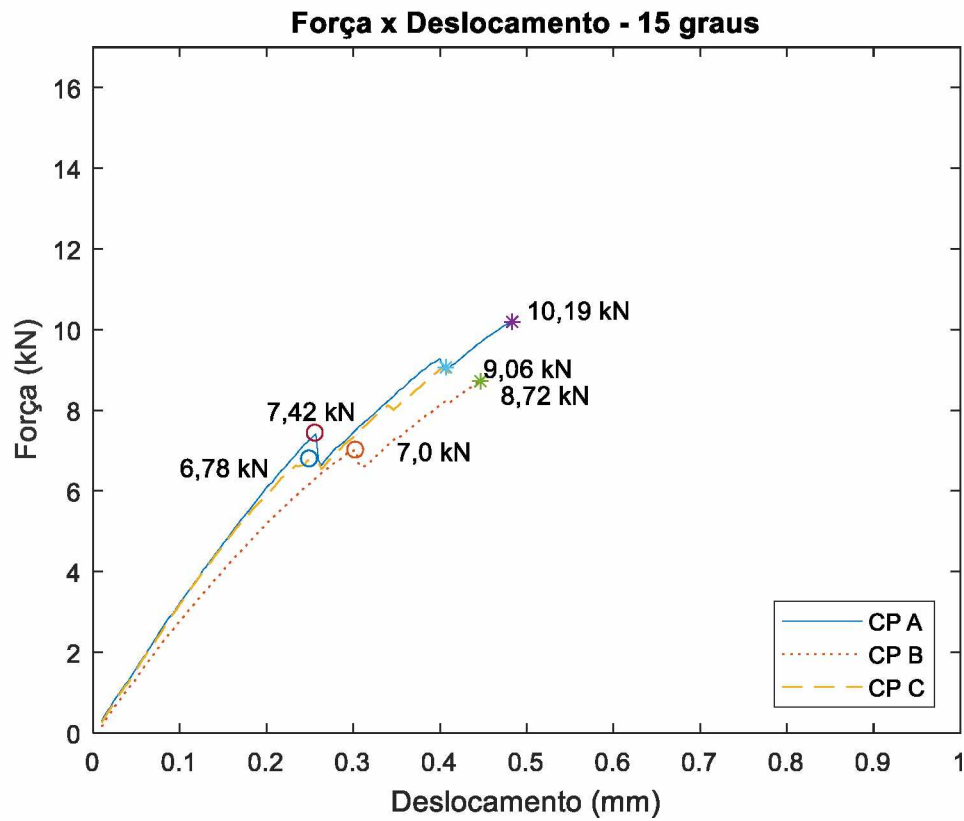


Figura 63 – Curva Força x Deslocamento para CP's com pinos inclinados a 15°.

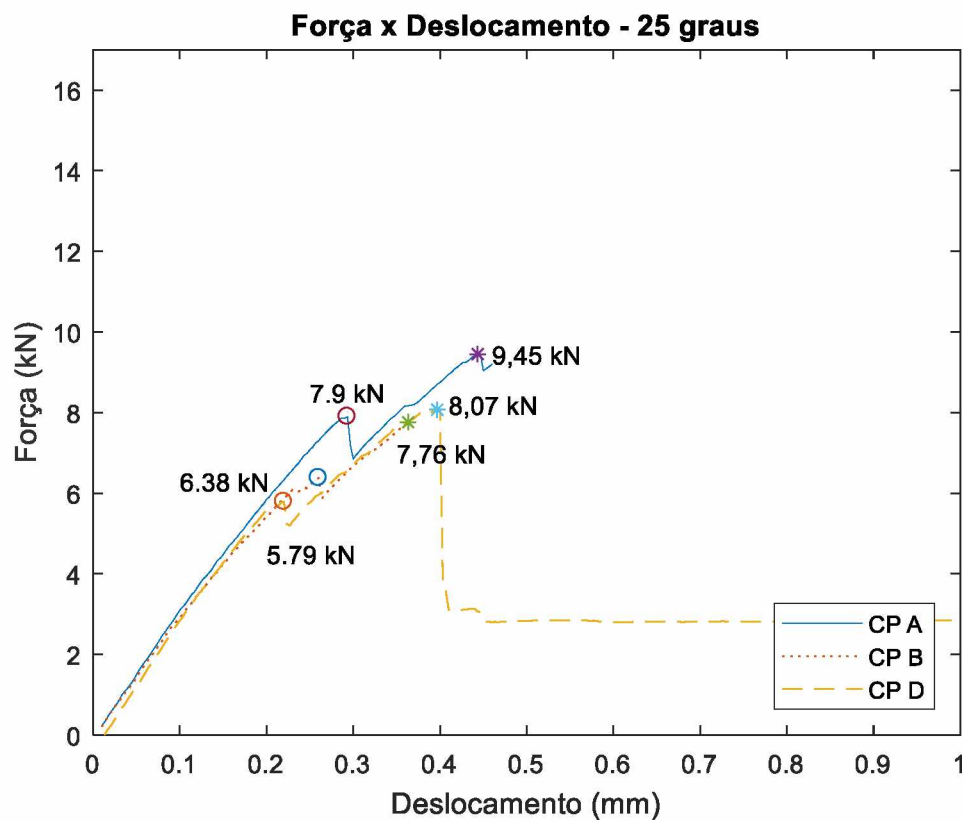


Figura 64 – Curva Força x Deslocamento para CP's com pinos inclinados a 25°.

Diferentemente dos corpos de prova com inclinações inferiores, os CP's fabricados com pinos soldados à 35 ° de inclinação apresentaram carga de falha adesiva em apenas duas amostras testadas. Por esta razão, um quarto corpo de prova inicialmente reserva (CP C) foi testado. Diferentemente do esperado, o novo CP testado também não apresentou carga de falha adesiva nítida, como pode ser observado pela Figura 65. Sendo assim, para a análise estatística da L_{AF} , os corpos de prova B e C foram descartados pois não apresentaram valores numéricos para tal diagnóstico. Já para a análise da carga máxima de tração, todos os quatro corpos de prova foram utilizados. Os valores médios destes parâmetros estudados constam também na Tabela 6.

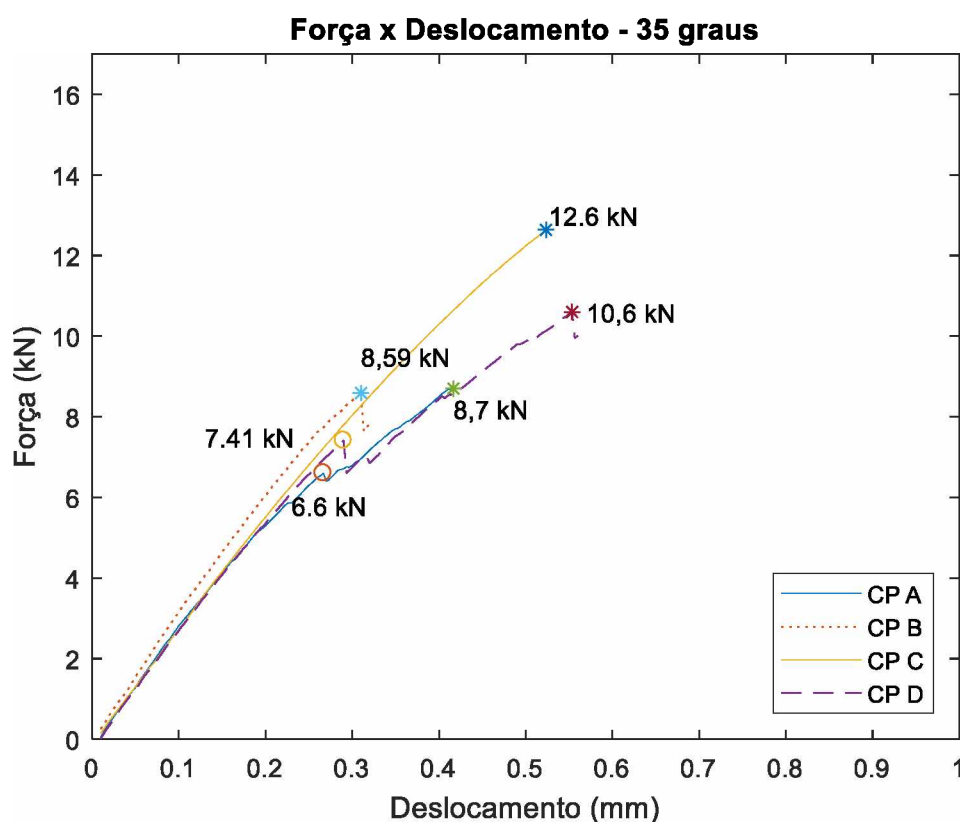


Figura 65 – Curva Força x Deslocamento para CP's com pinos inclinados a 35°.

Para efeito de comparação, corpos de prova com pinos de inclinação nula foram utilizados como referência. Carnio (2017) em seu projeto de conclusão de curso apresentou os dados das curvas de Força x Deslocamento para esta situação (Figura 66), informações estas utilizadas neste trabalho. Observando a Figura 66, nota-se que apenas um dos corpos de prova apresenta a carga de falha adesiva, indicada pelo círculo no gráfico.

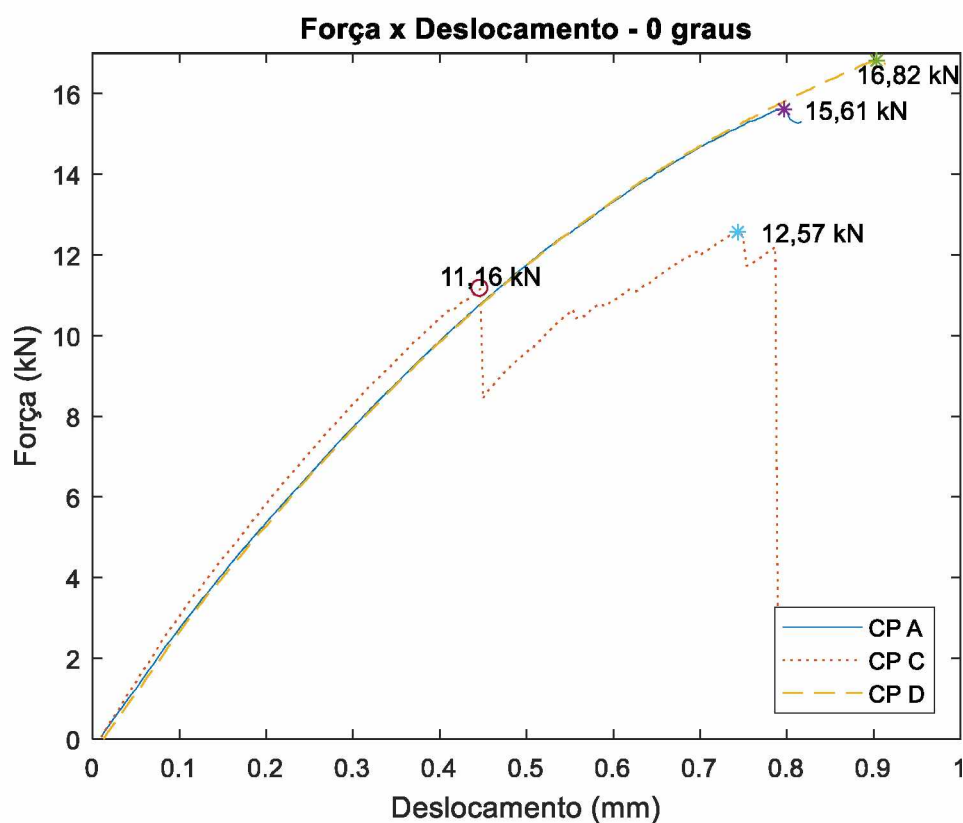


Figura 66 – Curva Força x Deslocamento para CP's com pinos sem inclinação. Fonte: Carnio, L. P., 2017.

Com as informações obtidas através do teste de tração dos corpos de prova, valores médios para a carga de falha adesiva e carga máxima foram calculados por meio de média aritmética e desvio padrão, sendo apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores das cargas máxima e de falha adesiva (todas em kN) para cada corpo de prova.

	CP	L _{AF}	Média	Desvio Padrão	L _{MÁX}	Média	Desvio Padrão
0 Graus	A	n/a			15,61		
	C	11,16	11,16	0	12,57	15,00	2,19
	D	n/a			16,82		
15 Graus	A	7,42			10,19		
	B	7,00	7,07	0,32	8,72	9,32	0,77
	C	6,78			9,06		
25 Graus	A	7,9			9,45		
	B	6,38	6,69	1,09	7,76	8,4267	0,90
	D	5,79			8,07		
35 Graus	A	6,6			8,7		
	B	n/a	7,01	0,57	8,59	10,13	1,9094
	C	n/a			12,64		
	D	7,41			10,6		

Ao analisar as curvas carga versus deslocamento obtidas por meio do teste de tração, observou-se que apenas o ensaio de um corpo de prova apresentou o comportamento final esperado em um teste deste tipo, que é a queda repentina de carga em um mínimo intervalo de deslocamento. Diante deste fato, optou-se por não caracterizar as cargas máximas dos testes como a carga máxima suportada pelo corpo de prova, exatamente pela impossibilidade de se afirmar e determinar o fim do teste de cada CP.

A solução encontrada para esta situação foi a realização de uma análise quantitativa de carga para dois deslocamentos específicos e distintos. Os valores de deslocamento escolhidos foram de 0,1 mm e 0,2 mm pois ambos se encontram dentro da faixa de comportamento elástico das curvas dos ensaios dos corpos de prova em geral. Os dados então foram obtidos e para cada grupo de inclinação foi calculada a média da carga suportada, assim como o desvio padrão. Os resultados são apresentados na Tabela 7. Para melhor visualização e comparação dos resultados, gráficos de barra com os valores médios da carga suportada juntamente com o intervalo do desvio padrão foram construídos. As Figuras 67 e 68 apresentam tais gráficos.

Tabela 7 – Valores de carga suportada para cada corpo de prova e dados estatísticos (todos em kN) para deslocamentos de 0,1mm e 0,2mm.

	CP	Deslocamento de 0,1 mm			Deslocamento de 0,2 mm		
		Carga	Média	Desvio Padrão	Carga	Média	Desvio Padrão
0 Graus	A	2,74	2,81	0,2042	5,37	5,49	0,2987
	C	3,04			5,83		
	D	2,65			5,27		
15 Graus	A	3,23	3,06	0,2548	6,09	5,72	0,4709
	B	2,77			5,19		
	C	3,19			5,88		
25 Graus	A	3,10	2,95	0,1345	5,85	5,62	0,2139
	B	2,91			5,43		
	D	2,84			5,57		
35 Graus	A	2,82	2,85	0,2132	5,29	5,55	0,3364
	B	3,16			6,03		
	C	2,72			5,51		
	D	2,70			5,35		

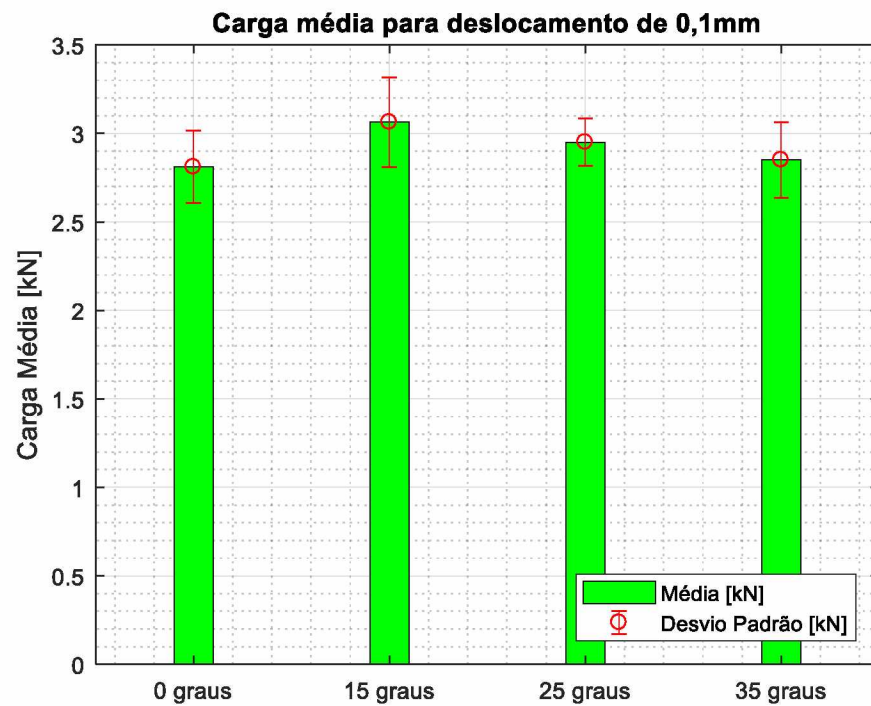


Figura 67 – Média e desvio padrão para carga suportada pelos CP's no deslocamento de 0,1 mm.

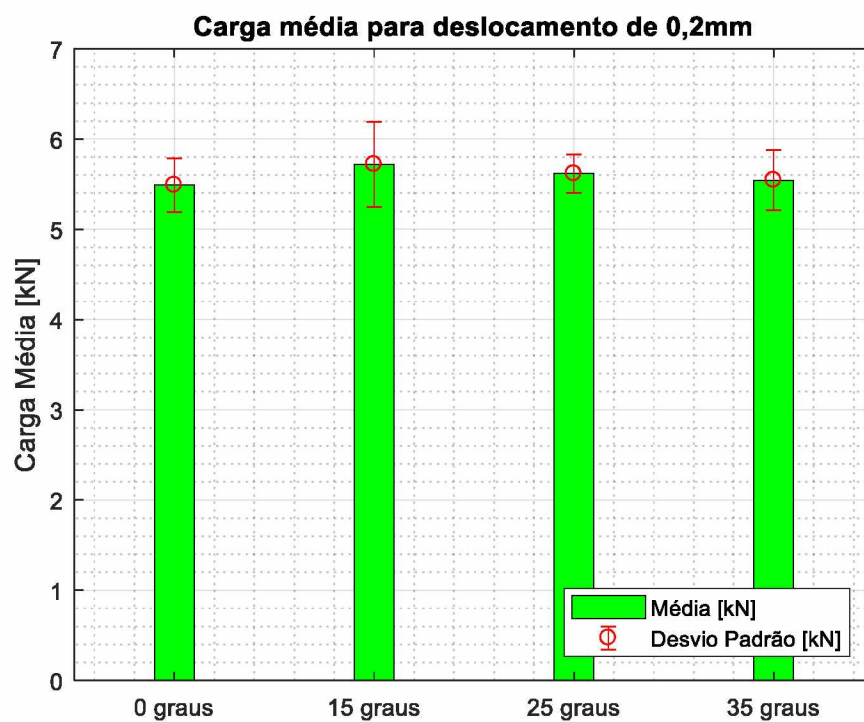


Figura 68 – Média e desvio padrão para carga suportada pelos CP's no deslocamento de 0,2 mm.

Pela análise das Figuras 67 e 68, é possível verificar um comportamento similar da carga suportada para os deslocamentos de 0,1 e 0,2 mm. Os pinos inclinados a 15 graus

apresentam, em média, o maior valor de carga tolerada, sendo 3,06 e 5,72 kN para os deslocamentos de 0,1 e 0,2 mm respectivamente (o que equivale à um aumento de 8,89% e 4,19% para os dois respectivos deslocamentos em relação aos CP's com inclinação de pinos nula). Observando os CP's com pinos inclinados a 25° e 35°, notou-se que o aumento da inclinação impactou na redução da carga suportada em comparação com os CP's com pinos a 15°, entretanto, nenhuma destas médias foi menor que o valor de carga tolerada pelos CP's com inclinação de pinos nula. Uma faixa de inclinações mais restrita (de 10° a 20°) pode ser explorada com o objetivo de encontrar um ponto ótimo de inclinação.

Ainda analisando os gráficos, é possível perceber que apesar de apresentarem uma maior carga suportada, o grupo de CP's com pinos inclinados à 15° também apresentou os maiores valores de desvio padrão entre os demais grupos de amostras. Por mais que o valor desta variável estatística tenha sido pequeno, isto implica que existe uma certa dispersão entre os resultados desse grupo em relação à média, ou seja, há uma discrepância maior dentro deste grupo. Com o objetivo de minimizar tal dispersão e aperfeiçoar a comparação, testes com um maior número de CP's deveriam ser realizados para aumentar o número de amostras e assim tentar reduzir o desvio padrão e a discrepância.

Em suma, observou-se que a inclinação dos pinos se apresentou como um parâmetro favorável para as juntas híbridas em todo instante anterior ao início da falha adesiva, ou seja, dentro do regime elástico da estrutura. Sob este ponto de vista, apesar de apresentar uma certa discrepância, a inclinação dos pinos à 15° foi a que apresentou maior carga suportada dentro desta faixa inicial de teste. Em relação à máxima carga suportada dos CP's, observou-se que o grupo de CP's com inclinação nula apresentou resistência maior aos esforços. Porém, a dúvida remanescente sobre o final do teste impede maiores comentários.

Pode-se destacar alguns aspectos que possivelmente afetaram diretamente o comportamento dos corpos de prova durante o teste de tração e, principalmente, após o início da falha adesiva.

O primeiro deles se refere à altura projetada na vertical que o pino apresenta dentro do material compósito (indicativo de capacidade de travamento dentro do compósito), tendo em vista que na medida em que a inclinação do pino aumenta, mesmo mantendo o comprimento do pino constante, a altura efetiva que realiza a função de trava mecânica, se reduz. Assim, é possível que a capacidade de carga máxima admitida pelo CP tenha se reduzido por este fator, ilustrado na Figura 69.

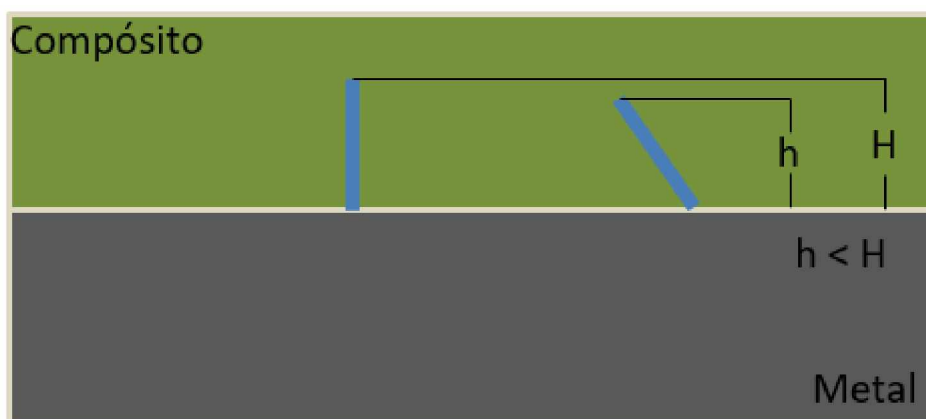


Figura 69 – Esquema representando a menor altura projetada dos pinos inclinados.

O segundo aspecto que pode ter afetado os resultados é relativo ao processo de laminação e cura do material compósito sobre a chapa metálica. Por limitações de materiais, foi impossível realizar esta etapa específica em um ambiente dotado de vácuo e com aquecimento, o que seria o ideal. A aplicação de pressão constante suprime as porosidades, que são os principais problemas de peças laminadas e curadas. Isso ocorre pois com esta força extra, a resina penetra as menores regiões da estrutura antes preenchidas por ar. Além disso, elevadas temperaturas reduzem a viscosidade da resina permitindo seu maior fluxo e penetração em torno das fibras (Centea, Grunenfelder, & Nutt, 2014). Esta influência pode ser intensificada quando se trabalha com pinos inclinados pois a qualidade da laminação no espaço entre o pino soldado e a chapa metálica é extremamente difícil de ser controlada e, mesmo sendo bem realizada, durante o processo de cura em meio aberto pode haver infiltração de ar e aumento da porosidade.

Por fim, o terceiro grande fator cogitado como influente nos resultados dos testes de tração é o acúmulo de tensão gerado na base do pino soldado quando este é submetido ao carregamento. Este acúmulo de tensão pode ter sido um fator preponderante e estimulador para o início da falha adesiva dos pinos, o que levou ao descolamento adesivo do material compósito com a chapa metálica. Ao observar a Figura 70, é possível perceber que a força de tração aplicada pela máquina de testes é decomposta em duas componentes, uma perpendicular e outra longitudinal em relação à direção do pino. Tal força perpendicular é a responsável por gerar o momento em torno da solda do pino, que, ao ser rotacionado, leva e levanta consigo a chapa de material compósito, já que o pino está estritamente dentro do compósito, ainda mais pela presença da cabeça abaulada. Com esta decomposição pôde-se perceber um comportamento de flexo-compressão e cisalhamento dos pinos. Em soma, quando o pino está com uma inclinação nula ou na direção do carregamento aplicado, observa-se que este possível efeito deletério da componente perpendicular de compressão é eliminado (Figura 71), não contribuindo para o descolamento da resina adesiva entre o

compósito e o metal (diferentemente do que ocorre na situação contrária apresentada na Figura 70).

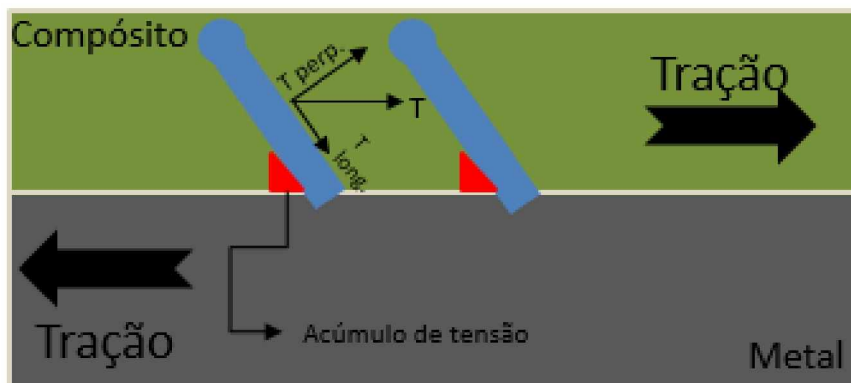


Figura 70 – Esquema representando o acúmulo de tensão ocasionado pela rotação do pino em torno do ponto de solda e representando o posicionamento das forças decompostas no pino na situação de pino inclinado contra a tração.

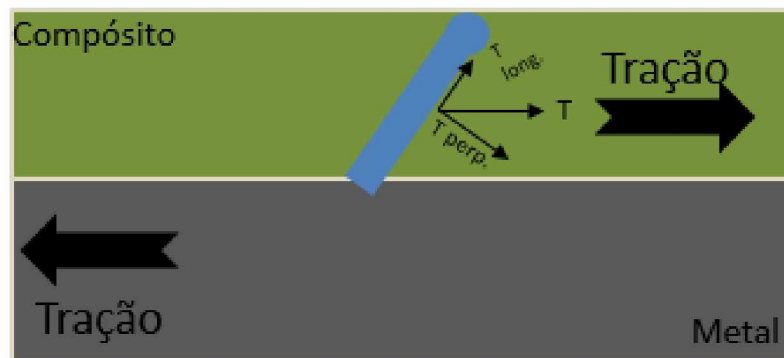


Figura 71 – Esquema representando o posicionamento das forças decompostas no pino na situação de pino inclinado em favor da tração.

5.4 PARÂMETRO DE RIGIDEZ

Para comparar o desempenho mecânico das juntas fabricadas em cada situação de inclinação, foi calculado um parâmetro de rigidez (P_{RIG}) através da regressão linear dos pontos da curva Força versus Deslocamento dos corpos de prova. O coeficiente angular da reta de regressão obtida foi utilizado como parâmetro de rigidez para análise. Para verificar o grau de correspondência entre as duas variáveis em questão, foi calculado o parâmetro de correlação (R) (Viali). Foram utilizados pontos contidos na faixa de deslocamento entre 0 e 0,2 mm (com objetivo de calcular apenas a região elástica do teste) e o resultado para cada corpo de prova, com as médias e desvios padrões de cada grupo são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores do parâmetro de rigidez para cada corpo de prova e dados estatísticos para cada grupo de inclinação.

	CP	P _{RIG} (kN/mm)	R	Média (kN/mm)	Desvio Padrão (kN/mm)
0 Graus	A	28,030	0,9994	28,89	1,20
	C	30,263	0,9988		
	D	28,383	0,9993		
15 Graus	A	30,402	0,9994	28,94	2,28
	B	26,299	0,9989		
	C	30,107	0,9989		
25 Graus	A	29,551	0,9993	29,02	1,37
	B	27,456	0,9988		
	D	30,043	0,9988		
35 Graus	A	27,750	0,9989	28,68	1,29
	B	30,598	0,9995		
	C	28,327	0,9999		
	D	28,082	0,9996		

Nota-se que tal parâmetro de rigidez, medido em kN/mm, apresenta um leve crescimento com o aumento da inclinação dos pinos, o que vai de encontro com a intenção de intensificar a função de travamento dos pinos, exceto para a inclinação de 35° que foi a menor entre todos os grupos. Essa redução pode ter sido ocasionada pelo alto grau de inclinação dos pinos que provocaram um travamento talvez muito pequeno (altura projetada muito pequena), resistindo menos ao deslocamento submetido. O parâmetro de correlação (R) apresentou índices extremamente altos para todas as regressões lineares, garantindo assim o ideal grau de relacionamento linear entre as variáveis dentro da faixa estudada.

A Figura 72 apresenta um gráfico de barras representando o valor médio do parâmetro de rigidez para cada grupo de inclinação de pinos com os seus respectivos desvios padrão. De modo geral, pode se assumir que a variação deste parâmetro é mínima e que as inclinações de pinos até 25° são indiferentes na caracterização mecânica da junta tendo em vista a rigidez.

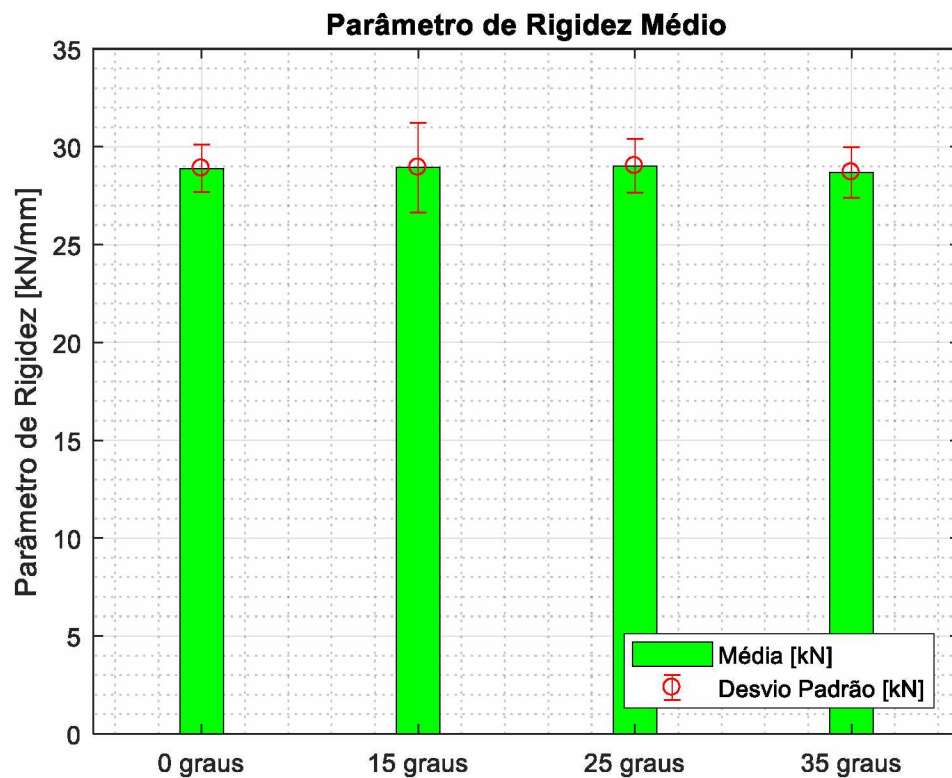


Figura 72 - Valores médios e de desvio padrão calculados para o parâmetro de rigidez.

Dessa forma, na faixa de parâmetros testados e pelos resultados obtidos a inclinação dos pinos mostra-se como uma boa opção para amplificar o travamento mecânico de juntas híbridas, mesmo tendo influência marginal, já que suporta uma maior carga e maior deformação. Pode-se acreditar que os pinos inclinados funcionem melhor em outros tipos de carregamentos, como em flexão da junta, por exemplo.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

No que tange o ambiente da engenharia moderna, o uso de materiais compósitos em estruturas tem se tornado bastante recorrente. Diante disso, o estudo desses materiais e de suas interações com outros torna-se essencial para o desenvolvimento destas tecnologias. Nesse sentido a junção entre chapas metálicas e componentes compósitos mostra-se como um fundamental foco de pesquisa. A intenção deste estudo em verificar a influência da inclinação dos pinos em junções híbridas (mecânica e adesiva) vai no sentido de aperfeiçoar este método de união já conhecido.

O primeiro objetivo alcançado abrangeu todas as etapas de fabricação dos corpos de prova, associando os conhecimentos teóricos adquiridos na graduação com a necessidade prática de manufatura. Os doze corpos de prova fabricados apresentaram características uniformes, o que permite concluir que o processo executado contemplou o que foi previamente projetado. De maneira positiva, foi possível participar presencialmente de cada detalhe da etapa de fabricação e com isso aprender e aplicar a metodologia do trabalho como um todo.

Se tratando dos resultados obtidos, os dados confirmaram o que era esperado pela literatura. A inclinação dos pinos em juntas híbridas apresenta uma influência minoritária em um teste de tração se comparada com outros parâmetros, como a variação da quantidade de pinos e o formato dos pinos. É importante considerar que a inclinação dos pinos deve ser controlada e que, em excesso, ela passa a ter um efeito contrário ao de se aumentar a resistência mecânica. Quando os pinos estavam inclinados a 15° os resultados obtidos para rigidez e carga em regime elástico foram ligeiramente melhores entre os grupos de inclinação definidos (0 , 15° , 25° e 35°). Existe um ponto de inclinação ótima, que ao analisar os resultados, pode-se inferir que está entre 10° e 20° . Já os pinos inclinados a 35° não apresentaram vantagens e os pinos inclinados a 25° apresentaram um benefício pouco significativo. Destaca-se que caso a laminação e cura fossem executadas em ambiente a vácuo e termicamente controlado, os resultados poderiam ser mais precisos. Comprovou-se também a influência quase nula do acréscimo de massa na inclusão de pinos na superfície metálica, o que permite afirmar que o uso de pinos não causa impacto negativo na importante relação entre as variáveis peso e resistência mecânica. Além disso, o problema relacionado à indeterminação do instante final do teste impossibilitou produzir afirmações concretas acerca da carga máxima suportada por cada grupo de inclinação.

Em suma, pode ser afirmado que os objetivos do trabalho foram alcançados e foi possível chegar a inferências importantes para a continuação dos estudos relativos à caracterização de juntas híbridas entre materiais compósitos e metálicos.

7 POTENCIALIDADES E TRABALHOS FUTUROS

É aconselhável que, para os trabalhos futuros envolvendo juntas entre metais e compósitos, o processo de laminação e cura do material compósito seja realizado em um meio controlado termicamente e sob vácuo, com o objetivo de diminuir a viscosidade da resina utilizada e reduzir a porosidade da estrutura devido à melhor compactação.

Durante o processo de fabricação, é importante que seja garantida a espessura constante entre as chapas de metal de material compósito. Caso tal uniformidade dimensional não seja garantida, um esforço extra de torção poderá surgir e consequentemente o desenvolvimento da falha será alterado.

Na realização do ensaio de tração, é importante que seja observado o instante final do teste para que se possa obter o valor de carga máxima resistida pela placa.

Uma série de outros ensaios mecânicos podem ser realizados com o objetivo de melhor caracterizar o comportamento da junta. Dentre eles, destacam-se testes de fadiga, impacto, flexão e até mesmo simulações computacionais.

Alguns outros parâmetros podem ser variados para observar a sua respectiva influência na junta híbrida, são eles: formato e distribuição e quantidade dos pinos na chapa metálica, materiais utilizados (tanto para o metal e tipo de fibra utilizada), mistura de pinos inclinados e retos, alternância de camadas de fibras, variação do diâmetro do arame de solda para obter pinos mais grossos, variação da espessura das chapas, entre outros.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adams, R. D.; Comyn, J.; & Wake, W. C. (1997). *Structural Adhesive Joints in Engineering*. Springer Science & Business Media.

Airbus A350 Specs. (s.d.). Acesso em 26 de 01 de 2017, disponível em Modern Airlines: <http://www.modernairliners.com/airbus-a350-xwb-introduction/airbus-a350-xwb-specifications/>

Alfano, M.; Lubineau, G.; Franco, F.; & Paulino, H. G. (2012). Study on the role of laser surface irradiation on damage and de-cohesion of Al/epoxy joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, pp. 33-41.

ASTM International. (2014). *ASTM D3039/D3039M-08, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. West Conshohocken, PA.

Boeing 787 Dreamliner Specs. (s.d.). Acesso em 26 de 01 de 2017, disponível em Modern Airlines: <http://www.modernairliners.com/boeing-787-dreamliner/boeing-787-dreamliner-specs/>

Cao R.; Sun, J.; & Chen, J. H. (2013). Mechanisms of joining aluminium A6061-T6 and titanium Ti-6Al-4V alloys by cold metal transfer technology. Em *Science and Technology of Welding and Joining* (p. Vol. 18).

Carnio, L. P. (2017). *Influência de tratamento superficial por lixamento em união híbrida de metal-compósito auxiliada por ancoradores mecânicos*. Uberlândia: UFU.

Centea, T.; Grunenfelder, L. K.; & Nutt, S. R. (22 de Outubro de 2014). A review of out-of-autoclave prepregs – Material properties, process. *ELSEVIER Composites: Part A*, pp. 132-154.

CMT: Cold Metal Transfer, Processo de solda MIG/MAG com arco voltaico em curto-circuito. (6 de março de 2016). Fonte: http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-288FCE80-FC95C839/fronius_brasil/CMT_cold_metal_transfer_pt.pdf

Earl, C.; Hilton, P.; & O'Neill, B. (2012). Parameter influence on Surfi-Sculpt processing efficiency. *Physics Procedia*, 327-335.

Eurofighter Typhoon - The Aircraft. (s.d.). Acesso em 26 de 01 de 2017, disponível em Eurofighter Typhoon: <https://www.eurofighter.com/the-aircraft>

Ferramentas Gerais. (s.d.). Acesso em 07 de 02 de 2017, disponível em <http://www.fg.com.br/produto/arame-de-solda-mig-er70s6-10mm-18kg-capaxcapa/8001200>

Gradinger, R.; Ucsnik, S.; & Scheerer, M. (2011). Innovative Principles of Design for Lightweight Composite Compounds in Aeronautical Structures. Austria: Aerodays.

Graham, D. P.; Rezai, A.; Baker, B.; Smith, P. A.; & Watts, J. F. (2014). The development and scalability of a high strength, damage tolerant, hybrid joining scheme for composite–metal structures. *Elsevier - Composites: Part A*, 11-24.

Kah, P.; Jibril, A.; Martikainen, J.; & Suoranta, R. (2012). Process Possibility of Welding Thin Aluminum Alloys. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, pp. 232-242.

Kim, H. S.; Lee, S. J.; & Lee, D. G. (1995). Development of a strength model for the co-cured stepped lap joints under tensile loading. *Compos Struct*, pp. 593-600.

Matsuzaki, R.; Shibata, M.; & Todoroki, A. (2007). Improving performance of GFRP/aluminum single lap joints using bolted/co-cured hybrid method. *Elsevier - Composites: Part A*, 154-163.

Matsuzaki, R.; Shibata, M.; & Todoroki, A. (02 de 02 de 2008). Reinforcing an aluminum/GFRP co-cured single lap joint using inter-adherend fiber. *ScienceDirect*, pp. 786-795.

Moreira, R. C. (2016). Material compósito de matriz metálica reforçado com arame metálico e fabricado com processo de soldagem por fusão a arco elétrico. Uberlândia, Minas Gerais, Brasil: UFU.

Niu, S.; Chen, S.; Dong, H.; Zhao, D.; Zhang, X.; & Wang, G. (2016). Microstructure and properties of lap joint between aluminum alloy and galvanized steel by CMT. *Journal of Materials Engineering and Performance*, pp. 1839–1847.

Rezende, M. C. (2000). O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*.

Sercel. (s.d.). Acesso em 07 de 02 de 2017, disponível em <http://www.sercel.com.br/blog/fibra-de-vidro-blog/fibra-de-vidro-o-que-e-e-para-que-serve.html>

Shimadzu - Excellence in Science. (03 de 07 de 2017). Fonte: UX Series: <http://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/balance/semi-analiticas/ux.shtml>

Skhabovskiy, I.; Gartner, N.; Rodrigues, C. F.; Reis, R. P.; & Scotti, A. (18 de 11 de 2015). Parametrização da técnica cmt (cold-metal transfer) pin visando sua aplicação em trocadores de calor. *POSMEC 2015 – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*.

Smith, F. (2004). *COMELD - An innovation in composite to metal joining*. Bromsgrove: Composites Processing 2004.

Ucsnik, S. (2014). *Light Metals Technologies Ranshofen*. Seibersdorf: Austrian Institute of Technology.

Ucsnik, S.; Scheerer, M.; Zaremba, S.; & Pahr, D. H. (2009). Experimental investigation of a novel hybrid metal–composite joining technology. *Elsevier*, 369-374.

Ucsnik, S.; Scheerer, M.; Zaremba, S.; & Pahr, D. H. (2010). Experimental investigation of a novel hybrid metal–composite joining technology. *Composites: Part A 41*, pp. 369–374.

Viali, L. (s.d.). *SÉRIE: Estatística Básica - Texto v: Correlação e regressão*. Acesso em 03 de 03 de 2017, disponível em <http://www.pucrs.br>:

http://www.pucrs.br/famat/viali/graduacao/engenharias/material/apostilas/Apostila_5.pdf

Wittwer, L.; & Enzinger, N. (2011). Simulating the welding process of pin structures. *SYSWELD Forum*, (pp. 45-54).

Zhang, H. T.; Feng, J. C.; Heb, P.; Zhang, B. B.; Chen, J. M.; & Wang, L. (2009). The arc characteristics and metal transfer behaviour of cold metal transfer and its use in joining aluminium to zinc-coated steel. . *Materials Science and Engineering*, pp. 111–113.